

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Vliv strategie tavení kovového prášku při
3D tisku na mechanické vlastnosti
prototypů**

Effect of Metal Powder Melting Strategy on
3D Printing on Mechanical Properties of
Prototypes

Student:

Bc. Jakub Jakeš

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Jakeš**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv strategie tavení kovového prášku při 3D tisku na mechanické vlastnosti prototypů**
Effect of Metal Powder Melting Strategy on 3D Printing on Mechanical Properties of Prototypes
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti oceli 316L.
3. Návrh strategie 3D tisku a mechanického testování.
4. Vyhodnocení mechanického testování.
5. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

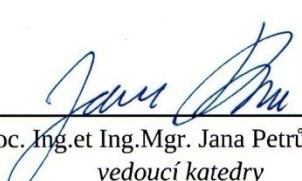
HORÁČEK, J. *Nauka o materiálu*. s. 200. Praha. ISBN 80-213-0397-2.
STRNADEL, B. *Nauka o materiálu: konstrukční materiály a jejich degradační procesy*. VŠB-TU Ostrava, 1993. 180 s., ISBN 80-7078-207-2.
SILBERNAGEL, A. *Nauka o materiálu I*. VŠB-TU Ostrava, 1996. 150 s. ISBN 80-7078-116-5.
DUŠEK, Lukáš. *Mechanické testování vzorků z oceli 316L po 3D tisku metodou SLM. Diplomová práce. 2017. VŠB-TU Ostrava. Vedoucí diplomové práce: Marek Pagáč.*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

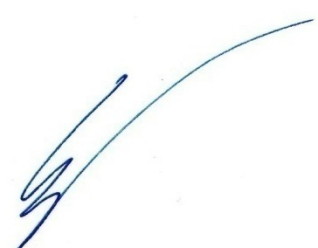
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Pagáč, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. 5. 2018

A handwritten signature in blue ink, reading "Jakub Jakes", written over a horizontal dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. 5. 2018



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jakub Jakeš

Adresa trvalého pobytu autora práce: Bratříkovice 32, 747 52

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JAKEŠ, Jakub. Vliv strategie tavení kovového prášku při 3D tisku na mechanické vlastnosti prototypů: *diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 59 s. Vedoucí práce: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou 3D tisku kovu ve vztahu k mechanickým vlastnostem a pórovitostí. Teoretická část práce se zabývá stručným seznámením s aditivní výrobou a technologií selektivního tavení laserem. Následuje podrobná analýza vlivů parametrů procesu SLM na mikrostrukturu, pórovitost a mechanické vlastnosti vyrobených dílů. Úvod praktické části je věnován stručnému popisu výrobního zařízení, vlastnostem práškového kovu a výrobě zkušebních vzorků pomocí dvou odlišných strategií. Následuje provedení zkoušky tahem a zhodnocení získaných výsledků.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JAKEŠ, Jakub. Effect of Metal Powder Melting Strategy on 3D Printing on Mechanical Properties of Prototypes: *Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 59 p. Thesis head: Ing. Marek Pagáč, Ph.D.

This master thesis deals with the metal 3D printing and its relation to mechanical properties and porosity. The theoretical part focuses on the brief introduction to additive production and selective laser melting technology. The following is a detailed analysis of the influence of SLM process parameters on microstructure, porosity and mechanical properties of manufactured parts. The introduction of the practical part gives a brief description of the production facility, the properties of the powdered metal, and the production of test samples using two different strategies. In the end, the thesis is devoted to the tensile test and the evaluation of the obtained results.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	9
1. Aditivní výroba (AM)	10
1.1 Selective Laser Melting	11
1.2 Výhody technologie SLM	12
1.3 Strategie skenování technologií SLM	13
2. Vliv parametrů procesu na mikrostrukturu, pórovitost a mechanické vlastnosti dílů vyrobených metodou SLM z nerezové oceli 316L	15
2.1 Mechanismy vzniku pórovitosti	15
2.2 Optimální hustota laserové energie ve vztahu k pórovitosti u oceli 316L	20
2.3 Zvyšování rychlosti výroby při zachování nízké pórovitosti u oceli 316L	22
2.4 Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti	23
3. Zkouška tahem	26
3.1 Popis a charakteristika tahové zkoušky	26
3.2 Napěťové deformační charakteristiky tahové zkoušky	28
3.3 Zkušební tyče pro zkoušku tahem	31
3.4 Zařízení pro tahovou zkoušku	32
4. Výroba zkušebních vzorků	33
4.1 Výrobní zařízení Renishaw AM 400	33
4.2 Nerezová ocel 316L	34
4.3 Výroba zkušebních vzorků	36
5. Vyhodnocení tahové zkoušky	41
5.1 Zhodnocení výsledků tahové zkoušky	48

Závěr.....	50
Poděkování.....	52
Seznam použité literatury.....	53
Seznam obrázků	57
Seznam tabulek.....	59

Seznam použitých značek a symbolů

A	–	tažnost	[%]
AM	–	aditivní výroba	
CAD	–	počítačem podporovaný návrh	
ČSN	–	česká technická norma	
EN	–	evropská norma	
HV	–	tvrdost podle Vickerse	
ISO	–	mezinárodní organizace pro standardizaci	
Q	–	hustota energie	[J / mm ³]
Ra	–	povrchová drsnost	[μm]
R _E	–	mez pružnosti	[MPa]
R _e	–	mez kluzu	[MPa]
R _m	–	mez pevnosti	[MPa]
R _{p 0,2}	–	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _u	–	mez úměrnosti	[MPa]
SLM	–	selektivní laserové tavení	
Z	–	kontrakce	[%]
ε	–	poměrné prodloužení	

Úvod

3D tisk kovu technologií Selective Laser Melting patří v současné době mezi nejčastěji používané technologie Aditivní výroby. Hlavním přínosem této moderní technologie je výroba plně funkčních prototypů a tvarově složitých dílů, které prakticky nelze běžnými konvenčními metodami vyrobit. Jeho uplatnění se nachází v celé řadě aplikací od automobilového, leteckého a kosmického průmyslu až po zdravotnictví.

Při výrobě technologií SLM dochází k postupnému natavování práškového materiálu, které je charakterizováno vysokými teplotními gradienty. Ty mají vliv na konečnou mikrostrukturu a výsledné mechanické vlastnosti. Zvolené parametry výrobního procesu přímo ovlivňují metalurgické procesy výroby a konečné vlastnosti výrobků (pórovitost, kvalita povrchu, zbytková napětí). Tyto vlastnosti pak mají při namáhání rozhodující vliv na porušení výrobku v důsledku deformací, delaminací a prasklin. Je tedy důležité volit vstupní parametry výrobního procesu tak, aby bylo docíleno co nejlepších konečných vlastností vyráběných dílů. K tomu je třeba se zabývat problematikou těchto výrobních procesů a zkoumat účinky vstupních parametrů na výslednou strukturu. Jedině tak budou díly vyhotovené touto technologií dosahovat požadovaných mechanických vlastností a požadavků.

Cílem teoretické části této diplomové práce je zkoumání vlivu parametrů procesu SLM na mikrostrukturu, pórovitost a výsledné mechanické vlastnosti vyrobených dílů. Praktická část práce je zaměřena na výrobu zkušebních vzorků z nerezové oceli 316L pomocí dvou odlišných strategií a porovnání jejich vlivu na výsledné mechanické vlastnosti.

1. Aditivní výroba (AM)

Tato výroba známá také jako 3D tisk zahrnuje veškeré výrobní technologie, které pracují na principu postupné výroby komplexních trojrozměrných součástí. V podstatě jde o automatizovaný proces výroby, při kterém je výrobek postupně budován dle vytvořeného 3D modelu po jednotlivých vrstvách za určitých procesních podmínek a parametrů. Ty jsou charakterizovány použitou výrobní technologií, materiálem a výrobním zařízením. Obecně lze aditivní výrobu rozdělit do 3 základních částí, kterými jsou prášková metalurgie, předvýrobní a výrobní etapa a postprocessing, zahrnující dokončovací operace.

V minulosti byly tyto technologie využívány především pro rychlou výrobu plastových prototypů. Odtud vycházel pojem Rapid Prototyping, který tyto technologie slučoval. V rámci rychlého pokroku a modernizace se tyto výrobní technologie přestali omezovat pouze prototypovou výrobou, proto se dnes častěji používá pojem Aditivní výroba.

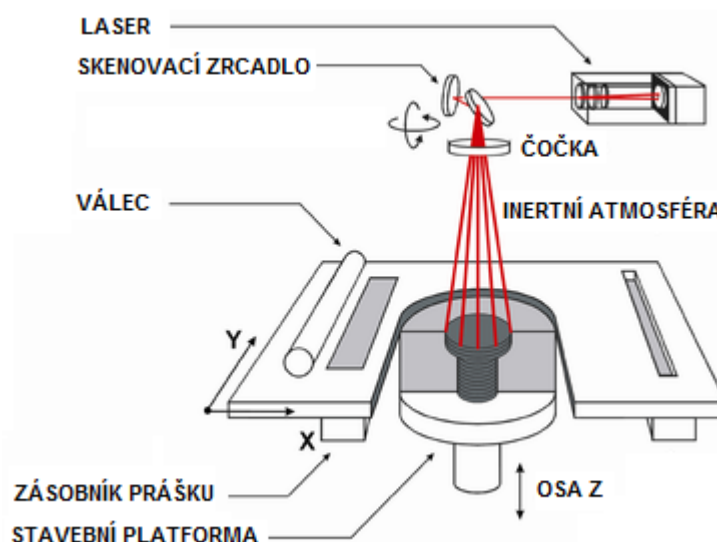
Možnost využití práškového kovu u technologie selective laser melting (SLM), jako výchozího materiálu pro výrobu kovových dílů, zapříčinila značný rozvoj AM v oblasti strojírenského průmyslu. Tato technologie umožňuje účinnou výrobu funkčních prototypů, které jsou vyráběny ze shodných, nebo podobných materiálů jako budoucí výrobek. Výsledné hodnoty následujících zkoušek jsou pak platné jak pro zkoušený prototyp, tak pro budoucí výrobek, což značně urychlí přípravu konečné výroby. U výroby odlitků, plechových dílů i ostatních součástí nahrazuje 3D tisk zdlouhavou výrobu licích forem, tvářecích nástrojů a speciálních přípravků nutných pro výrobu jejich prototypů. Výsledkem je rychlejší a zaručeně efektivnější výroba. [1, 2]

Výroba funkčních kovových dílů má význam především u konstrukčně složitých součástí, které nelze konvenčně vyrábět, nebo jejíž výroba je provázena nízkou produktivitou. 3D tisk tak nachází časté uplatnění v automobilovém a leteckém průmyslu. Zde je jeho největším přínosem zrychlení výroby prototypů a umožnění výroby tvarově optimalizovaných odlehčených součástí. V automobilovém průmyslu se jedná např. o zakázkovou výrobu chladících potrubí motoru, výfukových systémů, součástí čerpadel a dalších speciálních konstrukčních dílů, využívaných v motosportu. V letectví jde hlavně o optimalizaci součástí vedoucí ke snížení celkové hmotnosti za účelem zvýšení rychlosti a snižování spotřeby paliva. Významná je rovněž aplikace AM v lékařství při výrobě specifických implantátů a zubních protetik. Nelze opomenout ani výhody 3D tisku při výrobě konformního chlazení kovových forem pro vstřikování plastů. [1, 2]

1.1 Selective Laser Melting (selektivní laserové tavení)

Charakteristickým znakem technologie SLM je výroba součástí postupným natavováním tenkých vrstev práškového kovu, za použití vysoce výkonného CO₂ laseru nebo elektronového paprsku. Tavení a slinování jemného kovového prášku probíhá v hermeticky uzavřené komoře zbavené vlhkosti a vzduchu za použití inertního plynu, kterým může být argon nebo dusík.

Samotný výrobní proces vychází z 3D CAD modelu vyráběného dílu, který je pomocí speciálního softwaru rozdělen do několika vrstev. Každé takto vygenerované vrstvě přísluší rozdílná kontura řezu, která je definována průnikem dané vrstvy do vyráběného dílu. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozsahu 20–150 μm , je závislá na materiálu použitého prášku, velikosti zrn, konkrétní aplikaci, výrobním zařízení a zvolených parametrech výrobního procesu. Vrstva práškového kovu je nanášena na stavební platformu ze zásobníku. Kovový prášek je na povrch stavební platformy nanášen rovnoměrně pomocí válečku nebo obdobného mechanismu, který zajistí rovnoměrnou vrstvu požadované výšky. Vrstva prášku může být na stavební platformě předehřívána na teplotu, která se blíží bodu tání použitého materiálu. Děje se tak z důvodu zvýšení efektivity laseru. [2, 3]



Obrázek 1: Princip technologie SLM [4]

Po nanesení vrstvy dochází k lokálnímu tavení kovových částic požadované kontury laserovým paprskem. Výkon laseru se u dostupných výrobních zařízení pro technologii SLM pohybuje v rozsahu 100–1000 W. Průměr ohniska paprsku pak může být od 40

do 100 μm , u některých zařízení až do 500 μm . Po ukončení kontury dané vrstvy se celá platforma posune v ose Z směrem dolů a nanese se další vrstva. Tento proces se opakuje, dokud nedojde k natavení všech vrstev zadané součásti. [2, 3]

Po ukončení stavby je z pracovní komory odstraněn přebytečný netavený prášek, obklopující vyrobenou součást. K odsátí přebytečného materiálu slouží vakuový vysavač. Opětovné použití tohoto materiálu je možné až po zpracování v prosévacím zařízení, kde dojde k vyloučení částečně slinutého prášku a nežádoucích částic. K nejčastěji používaným kovům u technologie SLM patří nerezové oceli (316L), hliníkové slitiny, niklové superslitiny (Inconel 625, Inconel 718), titanové slitiny (Ti6Al4V ELI, Ti6Al4V, Ti6Al7Nb), komerčně čistý titan a další. [2, 3]

Na proces výroby navazují dokončovací operace, které jsou při AM nezbytné. V praxi tak po vytištění součásti následuje tryskání, které odstraní práškové usazeniny, dále případné obrábění, broušení a leštění. Důležitá je aplikace tepelného zpracování z důvodu dosažení co nejlepších vlastností vyráběné součásti. Docílí se tak snížení vnitřního pnutí, které by mohlo indikovat nechtěné deformace a materiálové vady.

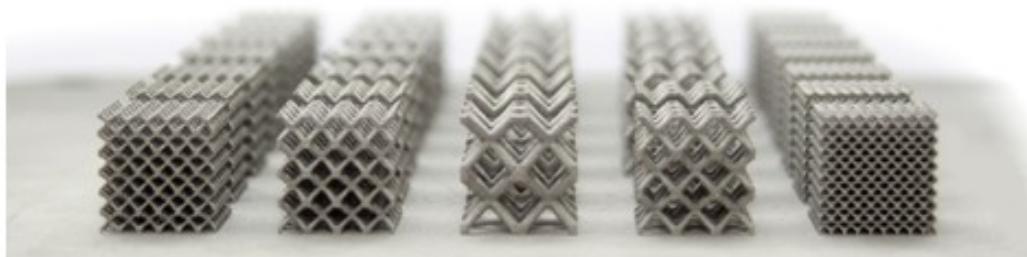
1.2 Výhody technologie SLM

Hlavní výhodou této technologie je jednoduchý automatizovaný proces výroby tvarově složitých součástí. Technologií SLM lze elegantně vyrábět i takové součásti, které prakticky ostatními konvenčními metodami nelze vůbec vyrobit. Další výhodou je možnost topologické optimalizace vyráběných dílů, jejímž účelem je snižování hmotnosti při zachování požadované pevnosti celé konstrukce. Dochází tak ke vzniku tzv. bionické konstrukce, kterou lze vidět na obrázku níže. [2, 3]



Obrázek 2: Topologická optimalizace konkrétní součásti [5]

Značnou výhodou AM je možnost výroby speciálních nosníkových výplní. Dojde tak nejen ke snížení spotřeby práškového kovu jinak plného dílu, ale především k redukci hmotnosti vyráběného dílu při zachování, nebo dokonce zvýšení pevnosti dané konstrukce. Materiál je tak pouze tam, kde je zapotřebí. [2, 3]



Obrázek 3: Příklad nosníkových výplní [6]

Mezi další výhody patří:

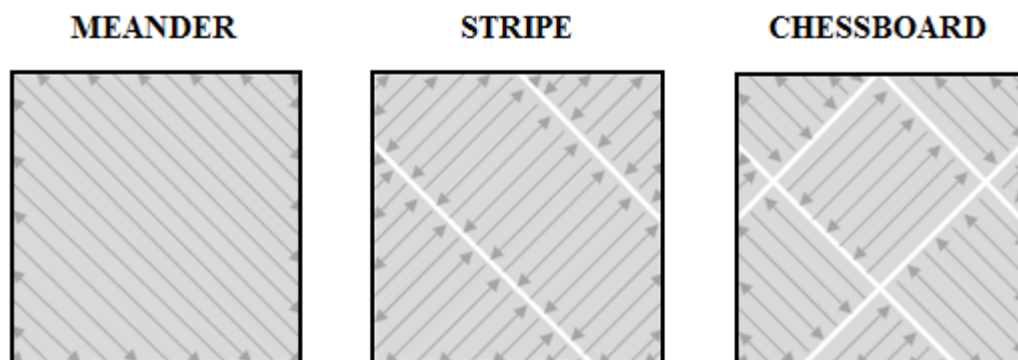
- výroba složitých geometrických prvků (chladicí kanálky, lopatky turbín)
- sloučení více dílů do jednoho, kdy snížíme počet prvků konečné sestavy navržením jedné složitější součásti
- díly jsou vyráběny přímo bez nákladných a složitých nástrojů nebo přípravků
- možnost opětovného použití nezpracovaného materiálu
- urychlení zavedení součásti do výroby (funkční prototypy) [2, 7]

1.3 Strategie skenování technologií SLM

Strategie skenování kovového prášku udává dráhu laserového paprsku při tavení daných kontur jednotlivých vrstev. Volba vhodné strategie je jeden ze způsobů jak snížit případná zbytková napětí, která při výrobě vznikají. Důvodem vzniku těchto napětí je rychlý ohřev a následné ochlazení natavených částic v rámci výrobního procesu. To má za následek vznik smykových sil mezi jednotlivými vrstvami a výslednou koncentraci zbytkového napětí. [8]

Software QuantAM, který je navržen specificky pro platformy aditivní výroby společnosti Renishaw používá tři základní strategie skenování. Jedná se o strategii skenování Meander, Stripe (pásky) a Chessboard (šachovnice). Jednotlivé strategie jsou při výrobě voleny v závislosti na geometrii vyráběných dílů a jejich velikosti. Metoda skenování ovlivňuje

délku snímacích (skenovacích) vektorů a tím i velikost zbytkových napětí. Platí tak, že strategie s kratšími skenovacími vektory generují méně zbytkového napětí. Vzory uvedených strategií lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 4: Strategie skenování práškového materiálu [8]

Použití skenovací strategie Meander je vhodné především pro tenkostěnné součásti malých rozměrů, kde skenovací vektory nedosahují takových vzdáleností. Tato strategie se prezentuje vyšší rychlostí tavení, kdy po každé vyhotovené vrstvě dojde k rotaci směru skenování o 67° . Tímto řízeným pootočením se docílí toho, že snímací dráhy jednotlivých po sobě jdoucích vrstev nebudou identické. [8]

Charakteristickým znakem strategie Stripe je dráha laseru tvořena přerušovanými pásy. Skenovací vektory jsou kratší, což příznivě snižuje koncentraci zbytkového napětí. Tato strategie se vyznačuje homogenním rozmístěním zbytkových napětí a větší rychlosti stavění, než u šachovnicové skenovací metody. Volba strategie Stripe, je stejně jako u metody Chessboard, vhodná pro větší a objemnější součásti. [8]

Chessboard neboli šachovnicová strategie rozděluje dráhu laseru do tabulí o rozměrech 5×5 mm tak, že každá sousedící tabule je pootočena o 90° . Rozdělením do jednotlivých tabulí se docílí rovnoměrného rozložení zbytkového namáhání, jelikož dojde k výraznému zkrácení skenovacích vektorů. Po každé vrstvě je skenovaný vzor opět pootočen o 67° . [8]

Strategie skenování má přímý vliv na parametry výrobního procesu. Jednotlivé procesní parametry, jako síla laseru a rychlost snímání, tak musí být optimalizovány pro danou strategii.

2. Vliv parametrů procesu na mikrostrukturu, pórovitost a mechanické vlastnosti dílů vyrobených metodou SLM z nerezové oceli 316L

Proces výroby technologií SLM je charakterizován vysokými teplotními gradienty, což může mít významný dopad na mikrostrukturu a výsledné mechanické vlastnosti takto vyrobených součástí. Při výrobním procesu tak vznikají problémy spojené s výslednou hustotou, pórovitostí, kvalitou povrchu a zbytkovým napětím, které mohou vést k porušení vyráběné součásti v důsledku deformací, delaminací a prasklin. Tyto nežádoucí jevy pak zabraňují použití AM pro aplikace s vysokou pevností a odolností proti únavě.

Vznik a intenzitu těchto nežádoucích jevů je možné výrazně ovlivnit vhodnou volbou počátečních parametrů výrobního procesu. Flexibilita procesu SLM umožňuje libovolně měnit parametry zpracování, kdy i malá změna jednoho z parametrů může vést k výraznému ovlivnění konečných vlastností vyráběné součásti. Případnou změnou určitých parametrů (výkon laseru, průměr ohniska paprsku, čas expozice, bodová vzdálenost) lze například regulovat výslednou energii laserového paprsku.

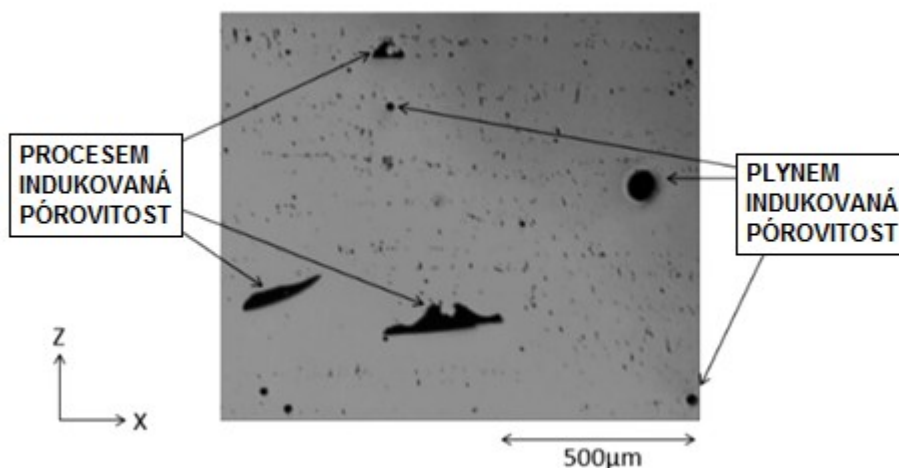
V rámci AM je tak žádoucí, aby byly důkladně pochopeny účinky parametrů zpracování na výslednou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. K tomu je třeba porozumět příčinám, které vedou k vzniku uvedených problémů (pórovitost, zbytková napětí, deformace, atd.). Následující kapitoly se tak budou zabývat přehledem současného stavu a odborného poznání v rámci zkoumání vlivů parametrů procesu SLM na mikrostrukturu, pórovitost a mechanické vlastnosti dílů vyrobených z nerezové oceli 316L.

2.1 Mechanismy vzniku pórovitosti

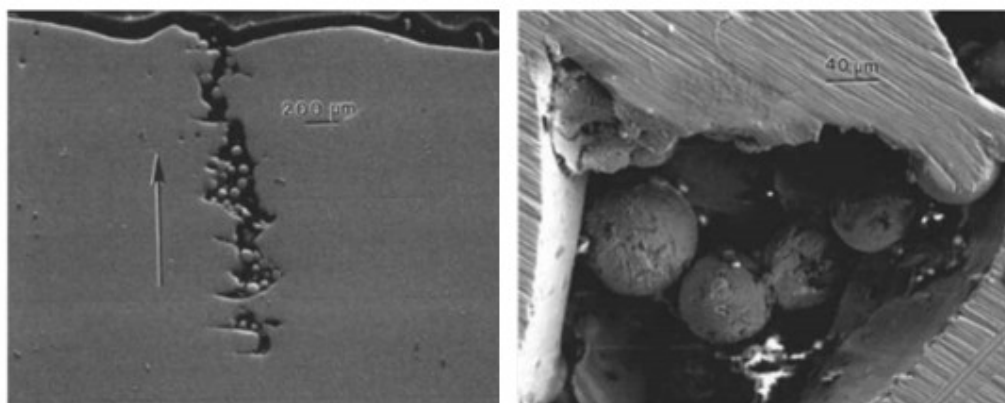
Stejně jako u tradičních způsobů výroby (lití, svařování) je pórovitost běžnou vadou AM, kterou je třeba minimalizovat nebo eliminovat z důvodu nepříznivých účinků na výsledné mechanické vlastnosti vyráběných dílů. Řada odborných publikací rozděluje v rámci AM pórovitost, dle mechanismu jejího vzniku, do dvou základních skupin. Jedná se o procesem nebo plynem indukovanou pórovitost viz Obrázek 5. [9, 10]

K procesem indukované pórovitosti dochází v případě nevhodně zvolených parametrů výroby. Ty musí být nastaveny tak, aby byl eliminován rozsah mechanismů vytvářející póry. Teoreticky můžou nastat následující případy vzniku procesem indukované

pórovitosti. V prvním případě je do výrobního procesu dodáno příliš malé množství tepelné energie, což má za následek nedokonalé tavení prášku a nedostatečné pronikání taveniny buď do substrátu, nebo do dříve nanesené vrstvy. Dochází tak ke vzniku tzv. kapes nespečeného prášku, tedy nesférických pórů, které mohou dosahovat různých velikostí v řádech mikrometrů až po milimetr. Tento jev lze vidět na Obrázku 6, kde jsou zobrazeny dva metalografické snímky kapsy s nespečeným práškem. [9, 10, 12]



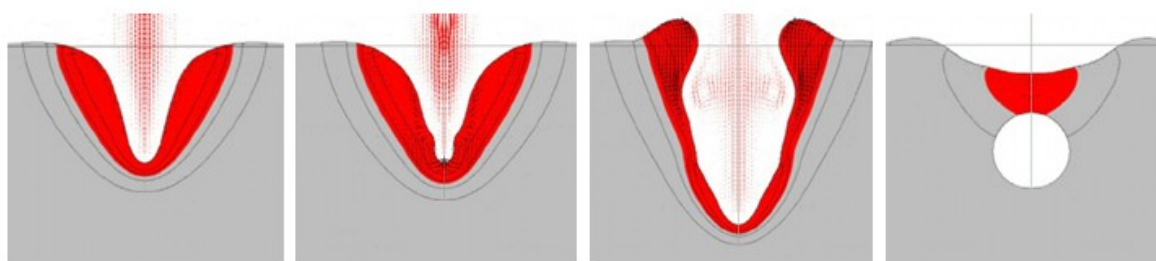
Obrázek 5: Mechanismy vzniku pórovitosti u SLM [10]



Obrázek 6: Snímky kapsy s nespečeným práškem [11]

V opačném případě může dojít, vlivem příliš velké hustoty laserové energie, k rozstříku roztaveného kovu. Dochází tak k rozptýlení taveniny do okolí lázně, což má za následek nedostatek taveniny v taveném místě. Důsledkem toho může dojít ke vzniku nepravidelných pórů. Je proto třeba zajistit výrobní parametry procesu tak, aby k rozstříku taveniny do okolí taveného místa nedocházelo. [11]

Příliš velké množství vneseného tepla může způsobit vznik tzv. klíčové dírky (keyhole). Tento jev lze popsat jako vytvoření plynové dutiny, která v procesu tavení obklopuje laserový paprsek. Důvodem jejího vzniku je kombinace silného odpařování a hluboké tavné lázně. Tyto dutiny mohou v průběhu tavení vznikat a zanikat. Při zániku dutiny (klíčové dírky) často dochází k zachycení odpařovaného plynu v místě jejího dna. Dojde tak ke vzniku póru, který má na rozdíl od ostatních procesem indukovaných pórů kruhový či oválný tvar. Princip vzniku pórů při zániku klíčové dírky lze vidět na následujícím obrázku. [9, 10, 11]



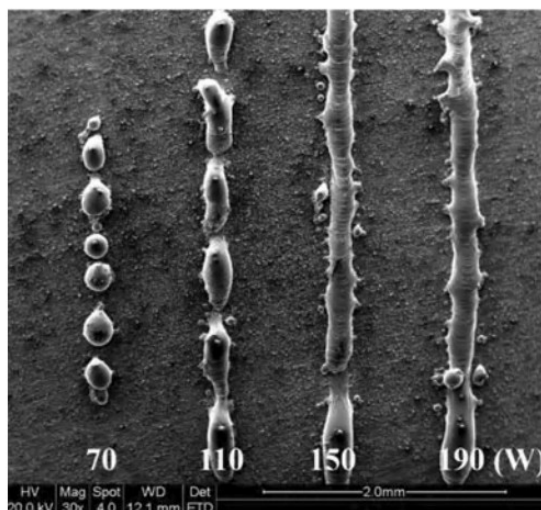
Obrázek 7: Vznik póru při uzavření klíčové dírky

Příkladem plynem indukované pórovitosti jsou sférické póry, které vznikají z plyných pórů uvnitř částic práškového materiálu. Plyn se do těchto částic může dostat při výrobě práškového kovu takzvanou atomizací plynem.

Atomizace plynem je nejběžnější způsob výroby práškového kovu pro využití u aditivních technologií. Při atomizaci je tavenina kovu rozprášena z trysky vycházejícím plynem (argon, dusík, hélium) za vzniku jemných kulových částic. I přes atmosféru s vysokým podtlakem uvnitř výrobní komory, nemusí použité plyny nutně unikat z taveniny. V důsledku rychlého procesu tuhnutí, mohou být tyto plyny uvězněny ve výsledné mikrostruktuře kovových částic. Velikost takto vzniklých pórů se pohybuje v rozmezí velikosti jedné částice práškového kovu. [2, 12]

Jak už bylo uvedeno, pro technologii SLM je charakteristické použití inertního stínicího plynu. Tyto inertní plyny nepodléhají chemickým reakcím a zabraňují tak kontaminaci roztavené kovové lázně nebo horkého zpevněného kovu. Jestliže nebude stínicímu plynu umožněn únik pryč z roztavené lázně, zůstane pak po jejím ztuhnutí uvězněn uvnitř. Dojde tak k vzniku dutin vyplněných inertním plynem, tedy ke vzniku plynem indukovaných pórů. [9]

Za vznikem pórovitosti stojí i tzv. Balling efekt, který významně ovlivňuje termodynamické a kinetické vlastnosti při slinování technologií SLM. Tento jev lze charakterizovat jako tvorbu drobných kovových kapiček sférických tvarů způsobenou snížením povrchového napětí taveniny a nelineárního tuhnutí. Lze jej pozorovat na povrchu právě slinuté vrstvy. Vlivem tohoto jevu dochází k vytváření nesouvislých skenovacích stop. Na následujícím obrázku lze vidět dráhy laseru a tvorbu jednotlivých kovových kapiček u zvolených výkonů. [12, 13]

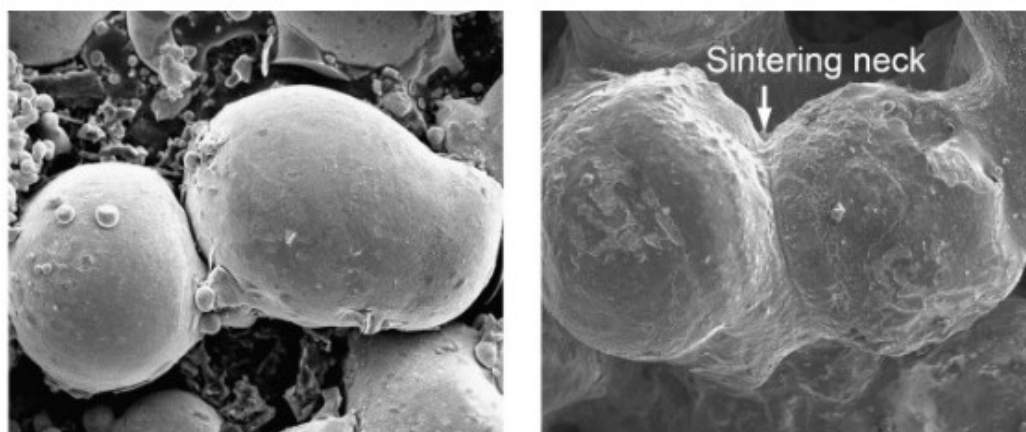


Obrázek 8: Tvorba kovových kapiček při slinování [14]

Vzniklé sférické částice dosahují různých velikostí. Při nanášení další vrstvy nespečeného prášku tak může dojít k jeho nerovnoměrnému nanesení, popřípadě znehodnocení celé součásti v důsledku kolize se stíracím břitem. Nerovnoměrná vrstva naneseného prášku má pak tendenci způsobovat nevyhovující drsnost povrchu, pórovitost, popřípadě delaminaci (separace vzájemně propojených vrstev). [13, 14]

Použití příliš nízkého laserového výkonu může mít za následek první příklad Balling efektu, který je charakterizován tvorbou výrazně hrubých kuliček. Tvorba lázně totiž závisí na provozní teplotě slinovacího systému, která je řízena výkonem laseru a rychlostí laserového snímání. Při nízkém výkonu laseru tak dochází, pro danou snímací rychlost, k snížení teploty slinování. To vede k zvýšení viskozity mezi kapalinou a pevnou látkou, což má za následek zhoršení proudění taveniny a přeměny částic. Vlivem omezeného množství tavné lázně pak nastává nedokonalé slinování, při kterém se roztavený kov transformuje do hrubých kuliček dosahujících přibližné velikosti průměru laserového paprsku. Děje se tak z důvodu nedostatečného růstu slinovacích hrdel (sintering neck) mezi

kovovými aglomeráty. Na obrázku níže jsou k vidění dva snímky, na kterých lze vidět tvorbu hrubých kuliček při nevhodném zvolení procesních parametrů a utvoření slinovacích hrdel při správném nastavení. [13]



Obrázek 9: Snímky mikrostruktury laserové stopy [13]

Druhým příkladem je tvorba mikrometrických kapiček (kuliček) vyvolaná rozstříkem taveniny. Při zvýšené skenovací rychlosti se lineární hustota laserové energie snižuje, což vede k poklesu pracovní teploty a průměru válcové dráhy roztaveného kovu. Tím dojde k zvýšení kapilární nestability taveniny. V důsledku toho mají malé kapičky roztaveného kovu tendenci rozstříkovat se pryč z povrchu roztavené dráhy. Po následném ztuhnutí se na slinovaném povrchu tvoří mikrometrické kulovité částice. Princip vzniku mikrometrických kapiček lze vidět na uvedeném schématu. [13]



Obrázek 10: Schéma rozstříku roztavených kapek [13]

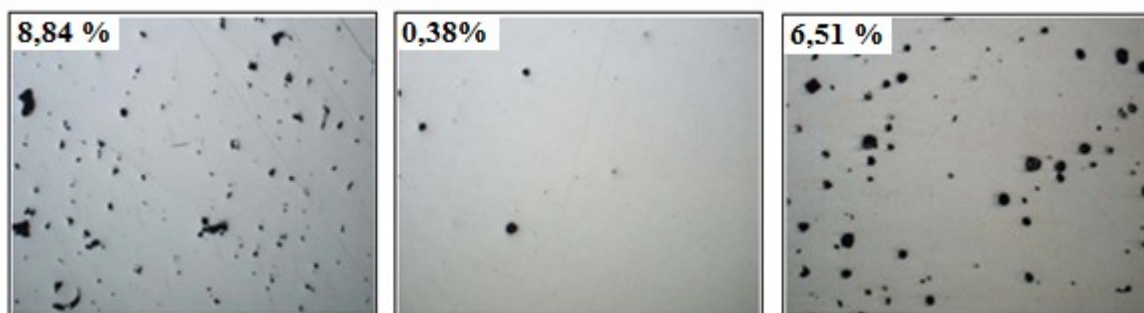
2.2 Optimální hustota laserové energie ve vztahu k pórovitosti u oceli 316

Z předchozí podkapitoly, zabývající se mechanismy vzniku pórovitosti, lze bezprostředně určit hustotu laserové energie, jako nejdůležitější parametr ovlivňující pórovitost vyráběných dílů. Hodnota této energie, udávána v J / mm^3 , se bude lišit v závislosti na použitém materiálu.

V rámci nerezové oceli 316L, která byla použita pro hlavní experiment této diplomové práce, bylo provedeno již několik odborných výzkumů v rámci dosažení minimální pórovitosti. Výzkum J. A. Cherryho a jeho kolektivu [15], který se danou problematikou u materiálu 316L zabýval, určil optimální hustotu energie pro dosažení minimálního procenta pórovitosti. V rámci tohoto výzkumu bylo na zařízení Renishaw AM 250 vyrobeno několik testovacích vzorků s různým časem expozice laseru (doba po kterou laser zůstává v jednom bodě) a bodovou vzdáleností (vzdálenost mezi po sobě jdoucími laserovými zásahy). Oba parametry byly nastaveny tak, aby došlo k vytvoření pevné součásti při dané hustotě energie Q (J / mm^3). Ostatní parametry výroby byly ponechány ve standardních nastaveních, které doporučuje výrobce zařízení (výkon laseru 180 W, vrstva materiálu 50 μm , strategie meander, apod.). [15]

V případě nižší hustoty laserové energie, která dosahovala hodnoty $41,18 \text{ J} / \text{mm}^3$, bylo u vyrobených vzorků docíleno 8,84% pórovitosti. Póry byly rovnoměrně rozptýlené a nepravidelné. V návaznosti na předchozí podkapitolu se tedy potvrdil fakt, že malé množství dodaného tepla způsobuje procesem indukovanou pórovitost způsobenou nedokonalým tavením.

Nejnižší procento pórovitosti bylo v rámci experimentu dosaženo při hustotě laserové energie $104,52 \text{ J} / \text{mm}^3$. Výsledná pórovitost činila 0,38 %. Oproti ostatním hodnotám tak bylo dosaženo přijatelné výsledné struktury, vykazující nejlepší vlastnosti.

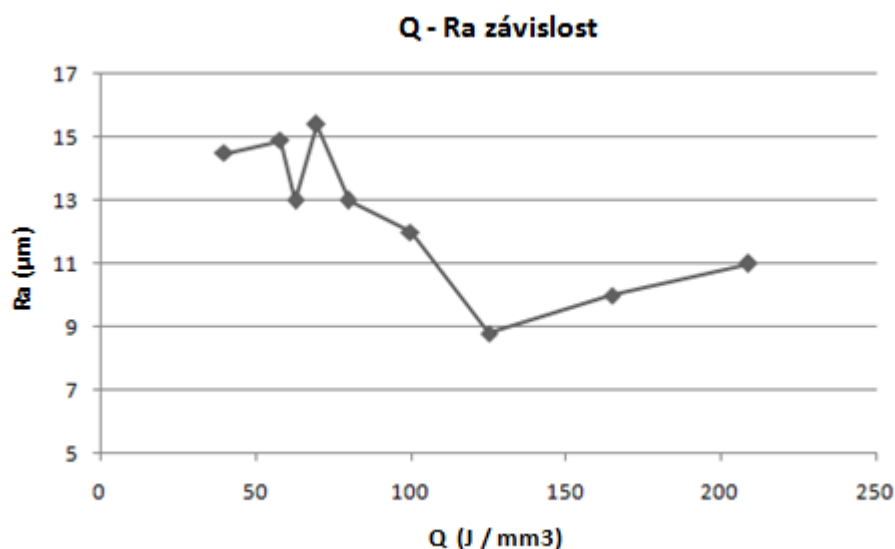


Obrázek11: Výsledná pórovitost vyrobených vzorků [15]

Další zvyšování laserové energie mělo za následek opětovné zvýšení procenta pórovitosti. U nejvýše získané hodnoty laserové energie, která činila $209,03 \text{ J / mm}^3$, již výsledná pórovitost dosahovala 6,51 %. Opět se tak potvrdila fakta předchozí podkapitoly, kdy vlivem vyšších hodnot vnesené energie dochází k opětovnému vzniku nežádoucích pórů (klíčová dírka, rozstřík). [15]

Potvrdili se tedy fakta popisující rozsah vzniku pórovitosti v závislosti na dodané tepelné energii. Dle provedeného zkoušení vyrobených dílů a současných výrobních možností AM, lze tedy určit optimální hustotu laserové energie pro nerezovou ocel 316 L. Jedná se o hodnotu $104,52 \text{ J / mm}^3$.

Hustota laserové energie rovněž ovlivňuje konečnou drsnost povrchu vyráběných dílů. Nejmenší povrchová drsnost byla měřena při příkonu $125,4 \text{ J / mm}^3$. V tomto případě činila bodová vzdálenost $25 \text{ }\mu\text{m}$ a doba expozice trvala $75 \text{ }\mu\text{s}$. Nejvyšší drsnost byla naměřena u příkonu $69,6 \text{ J / mm}^3$, kdy bodová vzdálenost dosahovala $75 \text{ }\mu\text{m}$ a doba expozice $125 \text{ }\mu\text{s}$. Doba expozice má tedy na výslednou drsnost povrchu minimální vliv. Rozhodující je bodová vzdálenost, která přímo ovlivňuje překrytí laseru a výslednou drsnost vyráběného povrchu. V následujícím grafu lze vidět závislost povrchové drsnosti R_a na hustotě laserové energie Q na konkrétním příkladu. [11, 15]



Obrázek 12:: Závislost energie laseru na drsnosti povrchu

2.3 Zvyšování rychlosti výroby při zachování nízké pórovitosti oceli 316L

Výroba technologií SLM se vyznačuje poměrně dlouhou dobou výroby, kdy vyhotovení součásti trvá často více jak 10 hodin. Jedná se o jednu z hlavních nevýhod této technologie. Je proto žádoucí, aby se doba výroby co nejvíce zkracovala. Hlavním cílem řady studií, jsou proto různá opatření, vedoucí k urychlení výroby při zachování požadovaných vlastností vyráběných dílů.

Zrychlením procesu výroby při zachování nízké pórovitosti se zabývá studie Zhongjie Suna a jeho kolektivu, zveřejněná v elektronickém vědeckém časopisu Materials & Design [16]. V rámci této studie bylo pro výrobu vzorků použito výrobní zařízení SLM 250 HL (SLM Solutions, Německo) o maximálním výkonu 400 W. Jako výchozí materiál byl použit prášek nerezové oceli 316L, atomizovaný plynem. [16]

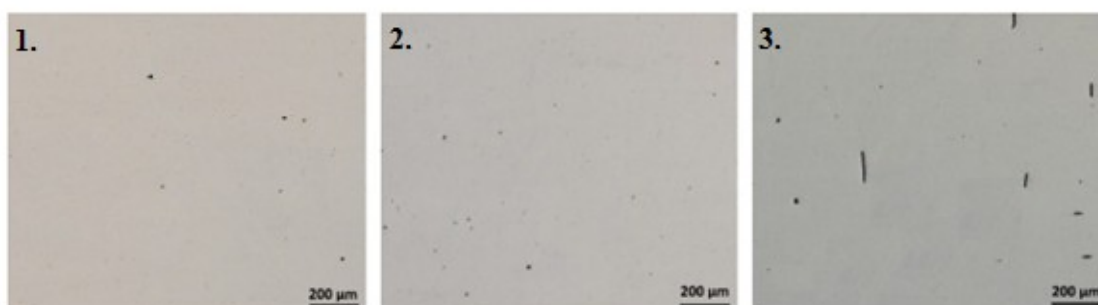
Pro výzkum byly k dispozici 2 sady 24 kostek o rozměrech $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. Pro výrobu 12 vzorků byl použit neměnný výkon 380 W, strategie skenování meander a tloušťka vrstvy $50 \text{ }\mu\text{m}$. Rychlost skenování a bodová vzdálenost (rozteč) byly u každého z vyrobených vzorků nastaveny tak, aby se dodaná hustota tepelné energie laseru pohybovala na úrovni optimální hodnoty pro materiál 316L. Vycházelo se zde z údajů předchozí kapitoly a jako optimální byla určena hodnota $104,52 \text{ J / mm}^3$. U jednotlivých vzorků byly parametry nastaveny tak, že vzorku s nejvyšší skenovací rychlostí příslušela nejmenší bodová vzdálenost a opačně.[16]

Dodržením optimální hodnoty vneseného tepla se docílilo toho, že všechny vyrobené vzorky vykazovaly hustotu větší než 99 %. Výzkum tak prokázal, že existuje přímý vztah mezi výkonem laseru a rychlostí skenování. Při porovnání výroby technologií SLM za použití 100 a 380 W laseru, může být rychlost skenování navýšena až 3,8 krát. Výsledná rychlost tisku součásti se pak může navýšit až o 72 %. Dojde tak k výraznému snížení času primárního procesu, což vede k zlepšení celkové produkce. [11, 15, 16]

Primární procesní čas představuje časový interval, ve kterém probíhá skenování laseru. Oproti tomu sekundární procesní čas zahrnuje veškeré ostatní operace výroby, jako např. nanesení vrstvy práškového kovu apod. Doba sekundárního procesu je ovlivněna mechanismy výrobního zařízení a jejich hardwarovými možnostmi.

Vzorky vyrobené s vyšší rychlostí skenování a kratší bodovou roztečí mají tendenci dosahovat nižší pórovitosti. Potvrdil se tak fakt, že i nepatrná změna výrobních parametrů má vliv na konečnou pórovitost. Ta u vyrobených vzorků nedosahuje výraznějších

procentuálních hodnot. Jak lze vidět na následujícím obrázku, póry se ve struktuře objevují jen sporadicky. Od šestého vzorku (snímek č. 2) se ale začínají objevovat svislé trhliny. Největší počet trhlin je obsažen u vzorku č. 12 (viz snímek č. 3). Jedním z možných důvodů vzniku těchto trhlin může být rostoucí tepelný gradient způsobený pomalými rychlostmi snímání. Snímek č. 1 na Obrázku 10 zobrazuje sférické póry vzniklé u prvního vzorku.



Obrázek 13: Snímky vybraných vzorků [16]

I když bylo všech 12 zkušebních vzorků vyrobeno při stejné hustotě laserové energie $104,52 \text{ J} / \text{mm}^3$, jejich pórovitost se mírně lišila. Proto je třeba brát hodnotu optimální laserové energie pouze jako nezbytnou podmínku, která zajistí dosažení vysoké hustoty vyráběných součástí i při vyšších rychlostech. Je proto vhodné nejprve určit optimální hodnotu Q a poté upravovat strategii skenování a ostatní procesní parametry.

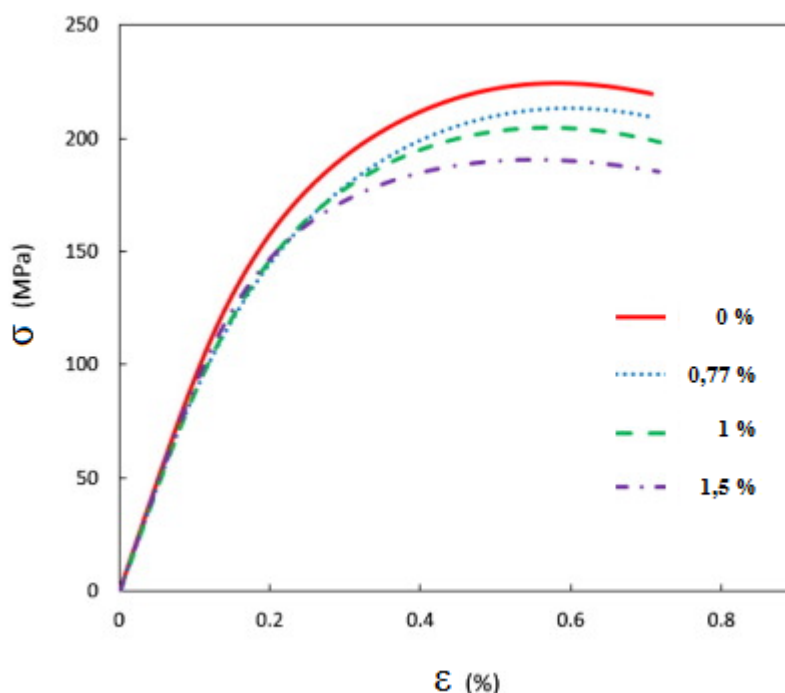
2.4 Vliv pórovitosti na mechanické vlastnosti

Dosažením vyšší hustoty vyrobených dílů dochází ke snížení obsahu vyskytujících se pórů uvnitř struktury. Tato struktura pak obsahuje malé póry sférických tvarů a vykazuje lepší mechanické vlastnosti.

Větší a nepravidelné póry obsažené u součástí nižších hustot (vyšších pórovitostí) totiž prokazatelně zvyšují koncentraci napětí, což může vést k předčasnému selhání a deformaci. V místě koncentrace napětí (uvnitř nepravidelných pórů) pak často vznikají únavové trhliny. Pórovitost pak přispívá k šíření těchto trhlin. Únavové trhliny totiž narůstají cestou nejmenšího odporu a rozšiřují se tak v závislosti na rozmístění jednotlivých pórů. V tomto směru tedy pórovitost výrazně ovlivňuje jejich vznik, růst a chování. [17]

Vznikem únavové trhliny dojde ke spojení jednotlivých pórů, což následně způsobí únavový lom materiálu. Porovnání mechanismů poškození materiálů vlivem sférických a nepravidelných (úhlových) pórů ukazuje, že v případě sférických pórů dochází k rovnoměrné plastické deformaci. Oproti tomu ostré hrany u nepravidelných pórů vedou k nerovnoměrnému rozložení napětí v okolí pórů a způsobují nehomogenní plastickou deformaci. [15, 17]

S nižším procentem pórovitosti tak bude mez pevnosti v tahu dosahovat vyšších hodnot. Na obrázku níže lze vidět simulovaný graf tahové zkoušky materiálu 316L u vybraných vzorků, kde jsou znázorněny jednotlivé křivky v závislosti na procentuální pórovitosti.



Obrázek 14: Graf tahové zkoušky porézních struktur [17]

S rostoucí porézností dochází ke snižování účinné plochy průřezu jednotlivých struktur. Při monotónním zatížení v tahu pak snížení účinné plochy působí jako místo koncentrace napětí, vlivem čehož dochází ke snížení pevnosti i výsledné tažnosti.

Pórovitostí je ovlivněna i výsledná tvrdost vyrobených součástí. Dokazují to výsledky jednotlivých studií, které prokázaly, že se zvyšující se pórovitostí se výsledná tvrdost snižuje. Děje se tak vlivem pórů, které se pod určitým zatížením hroutí. Sama pórovitost je ale závislá na výsledné hustotě vnesené tepelné energie. Je proto zřejmé, že pórovitost

nebude jediný činitel ovlivňující konečnou tvrdost. Tvrdost materiálu se tak zvyšuje i v důsledku rostoucí tepelné energie. Jako příklad lze uvést měření tvrdosti u vzorků vyrobených v rámci již uvedeného výzkumu J. A. Cherryho [15]. Tvrdost zkoušených materiálů se v tomto případě zvyšuje s dodanou tepelnou energií až do maxima 225 HV při hustotě $125 \text{ J} / \text{mm}^3$.

Je zřejmé, že právě pórovitost bude výrazným ukazatelem pro velikost mechanických hodnot součástí vyrobených technologií SLM. Do jaké míry bude záležet na volbě zvolené strategie rozhodné až praktická část této práce. Lze předpokládat, že rozhodující bude to, do jaké míry ovlivní zvolená strategie výslednou pórovitost. Jestliže dojde jen k nepatrným odlišnostem v rámci výskytu pórů, bude rozdíl výsledných mechanických hodnot patrně minimální. Rozhodující tedy budou výsledky tahové zkoušky vyrobených vzorků.

3. Zkouška tahem

3.1 Popis a charakteristika tahové zkoušky

Zkouška tahem patří mezi statické mechanické zkoušky, které se rozdělují podle druhu působícího namáhání na zkoušku tahem, ohybem, krutem a stříhem. Jejich charakteristickým znakem je působení stálých, nebo postupně se měnících sil. Zkušební vzorek je většinou zatěžován až do doby, kdy dojde k jeho poškození. Tyto zkoušky jsou nejčastěji prováděny za normálních teplot. V případě, kdy součást pracuje za odlišných vnějších fyzikálních podmínek, je potřeba, aby se daná zkouška těmto vlivům přizpůsobila (např. zkouška za vysokých teplot apod.). [18, 19]

Tahová zkouška je předepsána normou ČSN EN ISO 6892 – 1 (dříve ČSN 42 0310), která specifikuje metodu zkoušení tahem kovových materiálů a definuje mechanické vlastnosti, které mohou být stanoveny za pokojové teploty. Je jednou ze základních a nejdůležitějších zkoušek. [20]

Principem této zkoušky je tahové namáhání zkušební tyče upnuté do čelistí zkušebního stroje. Ta se v průběhu zkoušky prodlužuje až do svého přetržení. Zjišťují se přitom napěťové a deformační charakteristiky, mezi které patří:

- pevnost v tahu R_m
- mez kluzu R_e
- tažnost A
- kontrakce Z

Tyto základní deformační charakteristiky lze speciálním zkušebním postupem doplnit o modul pružnosti, mez úměrnosti a smluvní mez kluzu. [18]

V průběhu zkoušky se dále zaznamenává zatěžující síla F a odpovídající deformace. Zkušební tyč se v průběhu deformace prodlužuje a mění svůj průřez. Počáteční délka L_0 se tak mění na konečnou délku L_u a počáteční plocha průřezu S_0 na konečnou plochu průřezu S_u . Síla F představuje normálové napětí (R), jelikož působí kolmo k ploše příčného průřezu. Lze tak určit smluvní jmenovité napětí, jako podíl zatížení F a plochy původního průřezu S_0 , absolutní prodloužení zkušební tyče jako rozdíl koncové a počáteční délky a poměrného prodloužení. [19, 20]

- smluvní jmenovité napětí

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad [18]$$

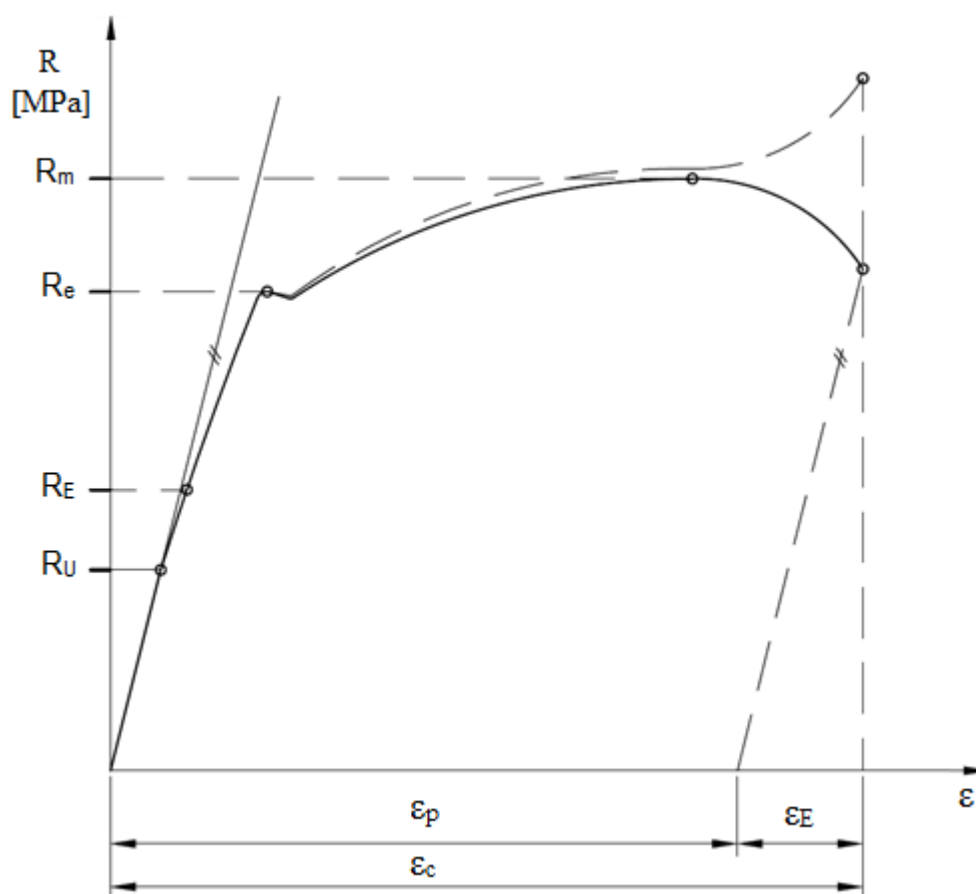
- absolutní prodloužení zkušební tyče po přetržení

$$\Delta L = L_u - L_0 \text{ [mm]} \quad [18]$$

- poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad [18]$$

Závislost $(F - \Delta)$ pak odpovídá závislosti $(R - \varepsilon)$ a tvoří pracovní nebo smluvní diagram tahové zkoušky.



Obrázek 15: Diagram tahové zkoušky [18]

Přímkový úsek na počátku diagramu znázorňuje pružnou deformaci a pomocí Hookeova zákona vyjadřuje úměrnost mezi napětím a deformací. Modul pružnosti v tahu

(E) geometricky odpovídá směrnici přímkového úseku diagramu. Pro výpočet Hookeova zákona platí následující vzorec:

$$R = E \cdot \varepsilon \quad [18]$$

3.2 Napět'ové deformační charakteristiky tahové zkoušky

Mez úměrnosti R_u

Mez úměrnosti R_u označuje mezní hodnotu platnosti Hookeova zákona. Nad její úrovní se křivka diagramu začíná vychylovat od přímkového průběhu. Dochází tak k rychlejšímu růstu deformace. [18, 19]

Mez pružnosti R_E

Až po hranici meze pružnosti R_E je deformace pružná, to znamená, že po zrušení tahové síly se zkušební tyč vrátí na původní délku. U polykrystalických materiálů se tato hodnota ovšem nevyskytuje, určuje se proto tzv. smluvní mezí pružnosti.

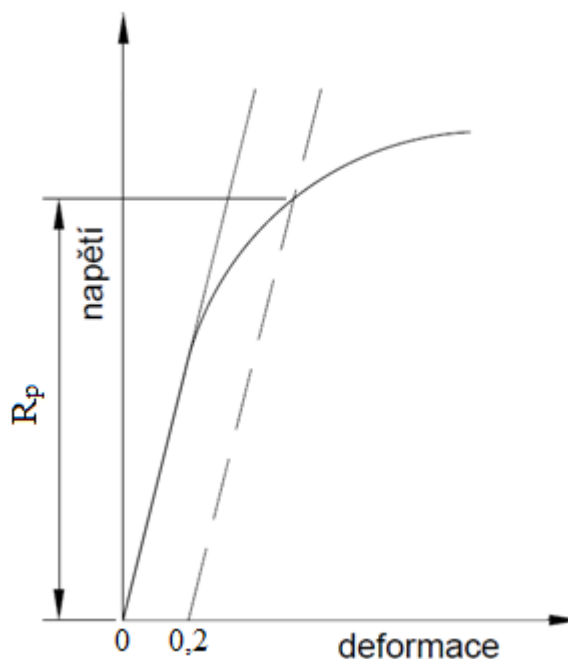
Smluvní mez pružnosti lze zjistit z diagramu tahové zkoušky a to během zatěžování zkušební tyče pomocí grafické metody. [18, 19]

Mez kluzu R_e

Mez kluzu R_e představuje nejmenší napětí, jehož vlivem dochází k znatelné deformaci. Ta může dočasně pokračovat i přesto, že nedochází k dalšímu zvyšování napětí. Tento úsek diagramu je ale vázán pouze na určité strukturní stavy. U některých materiálů se proto vůbec nemusí objevit. Výrazný je tento úsek například u měkkých uhlíkových ocelí, kde je často dobře zřetelné maximum a minimum (horní mez kluzu R_{eH} , dolní mez kluzu R_{eL}). Pokud se u daného materiálu nedá mez kluzu zjistit přímo z diagramu, určuje se pomocí tzv. smluvní meze kluzu. [18, 19]

Smluvní mez kluzu R_p lze stanovit z diagramu pomocí grafické metody, nebo průtahoměrem během zatěžování. Měří se napětí, při kterém dosáhne trvalá deformace předem stanovené hodnoty vyjádřené v procentech. V případně smluvní meze kluzu R_p 0,2 se tedy jedná o napětí, při kterém je způsobena trvalá deformace o velikosti 0,2 %.

Princip grafické metody určení R_p spočívá v nanesení hodnoty plastické deformace do diagramu. Při výpočtu se vychází z naměřené délky zkušební tyče. Způsob získání R_p z připraveného diagramu lze vidět na následujícím obrázku. [18, 19]



Obrázek 16: Grafické stanovení smluvní meze kluzu [18]

Mez pevnosti v tahu R_m

V okamžiku kdy napětí překročí hodnotu meze kluzu, dojde po celé délce zkušební tyče k plastické deformaci. Mez pevnosti v tahu R_m pak představuje bod, kdy tahová síla dosahuje nejvyšší hodnoty před samotnou destrukcí zkušební tyče. Z daného maximálního zatížení je pak odvozen následující vztah pro výpočet meze pevnosti v tahu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad [18]$$

Jakmile dojde k překročení meze pevnosti v tahu, začne křivka diagramu klesat. Křivka klesá až do okamžiku destrukce, tedy přetržení zkušební tyče. Děje se tak vlivem změny koncentrace napětí do jednoho místa. V tomto místě dojde k prudkému zmenšení průřezu zkušební tyče, po kterém může následovat vytvoření krčku. Tyč se následně přetrhne v místě nejmenšího průřezu. Materiály u kterých se při tahové zkoušce objevuje krček, mají R_m neodpovídající skutečnému tahovému napětí. Síla se totiž vztahuje na počáteční průřez. Z tohoto důvodu je diagram tahové zkoušky získaný z trhacího zařízení

diagramem smluvním. Skutečné tahové napětí představuje čárkovaná křivka na diagramu tahové zkoušky, viz Obrázek 16. [19, 20]

V praxi je mez pevnosti v tahu velmi důležitá, jelikož se podle ní rozdělují a porovnávají materiály používané nejen ve strojírenském odvětví. Velikost R_m je dána především strukturou materiálu a jeho chemickým složením.

Tažnost a kontrakce

Tažnost a kontrakce patří mezi tzv. charakteristiky tvárnosti. Tažnost materiálu A , lze vypočítat z poměrného prodloužení přetržené tyče. Pro její výpočet platí následující vztah:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad [18]$$

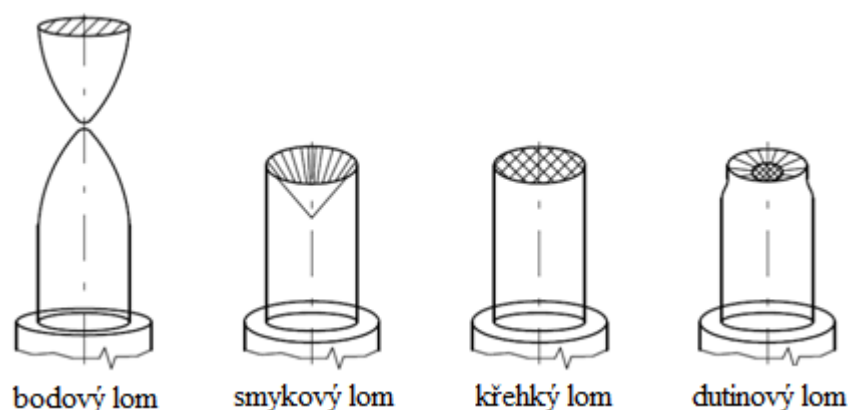
Kontrakce Z je dána změnou průřezu zkušební tyče, kdy je porovnáván počáteční průřez s průřezem po přetržení. Pro výpočet kontrakce se použije následující vzorec:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad [18]$$

Z diagramu tahové zkoušky lze dále určit hodnotu celkové deformace ϵ_c a podíl pružné a plastické deformace (ϵ_E a ϵ_p viz Obrázek 16)

Základní druhy lomů u tahové zkoušky

Vzhled lomové plochy je výrazně ovlivněn vlastnostmi zkoušeného materiálu a je charakterizován velikostí a homogenitou plastické deformace. Základní rozdělení lomů lze vidět na následujícím obrázku.



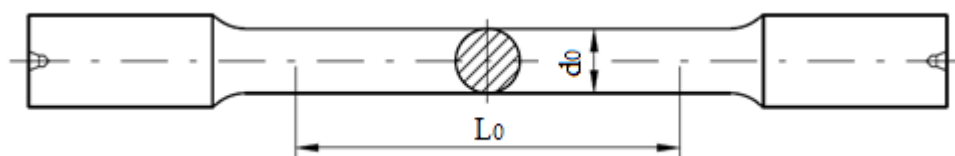
Obrázek 17: Základní druhy lomů zkušebních vzorků [18]

3.3 Zkušební tyče pro zkoušku tahem

Rozdělení zkušebních tyčí je dáno příslušnou normou, podle které jsou tyče rozděleny na dlouhé a krátké. V případě dlouhých tyčí je měrná délka rovna desetinásobku jejího průměru ($L_0 = 10 D_0$), u krátkých je měrná délka dána jejím pětinasobkem ($L_0 = 5 D_0$). Poměr použité délky musí být uveden u hodnoty tažnosti (A_5 , A_{10}) a to z důvodu jeho přímé závislosti na její výslednou velikost. U tyčí jiných průřezů je měrná délka stanovena dle příslušných výpočetních vztahů. [19]

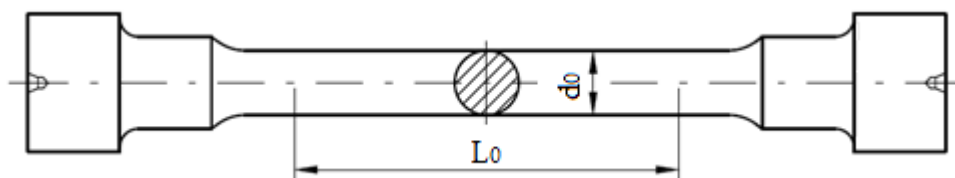
Tvar zkušebních tyče, podmínky jejího provedení a typ upínací hlavy jsou normovány. Volí se s ohledem na měřený materiál, způsob jeho upnutí a účel daného měření. Příklady vybraných typů lze vidět na následujících obrázcích. [20]

K upnutí zkušební tyče kruhového průřezu opatřené válcovými hlavami slouží samosvorné rychloupínací čelisti. Tento způsob upnutí je vhodný pro materiály s pevností do 900 MPa.



Obrázek 18: Zkušební tyč s válcovými hlavami [18]

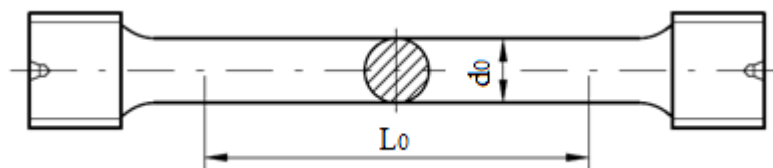
Tyče s osázenými hlavami (Obrázek 20), upínané do čelistí opatřenými kroužky, slouží k upínání materiálů vyšších pevností.



Obrázek 19: Zkušební tyč pro upínání do kroužků [18]

Poměrně často je po tahové zkoušce u zkušebních vzorků požadováno přesné měření délkových změn. Je proto třeba zabránit nežádoucím prokluzům v průběhu zvyšování napětí, které mohou mít nepříznivý vliv na přesnost naměřených hodnot a konečných výsledků.

Účinné řešení je v tomto případě použití zkušebních tyčí konstruovaných se závitovými hlavami.



Obrázek 20: Zkušební tyč se závitovými hlavami [18]

3.4 Zařízení pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku existuje řada zkušebních strojů různých konstrukcí. Mezi nejpoužívanější patří tzv. univerzální mechanické nebo hydraulické stroje. U mechanických trhacích zařízení je většinou tahové napětí měřeno a vyvozováno mechanicky, u hydraulických zařízení pak hydraulicky. Tato zařízení jsou konstruována tak, aby na nich bylo možno, po určité nenáročné modifikaci, provádět i zkoušky v tlaku, ohybu a stříhu. [19]

4. Výroba zkušebních vzorků

Výroba zkušebních vzorků pro praktickou část této diplomové práce, probíhala na výrobním zařízení společnosti Renishaw AM 400. Toto výrobní zařízení je součástí laboratoře Aditivní výroby na Fakultě strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Tato nově vybudovaná laboratoř se zabývá:

- vědecko-výzkumnou činností a vzděláváním
- testováním a měřením mechanických vlastností vytištěných dílů
- technologií, vývojem a testováním práškových kovů
- metodikou navrhování součástí (bionické konstrukce, topologická optimalizace)
- zakázková výroba kovových prototypů [21]

Následující podkapitoly se budou postupně zabývat parametry a vlastnostmi výrobního zařízení AM 400, popisem použitého práškového materiálu (316L) a průběhem výroby zkušebních vzorků, kde budou uvedeny základní parametry výroby apod.

4.1 Výrobní zařízení Renishaw AM 400

Toto moderní zařízení společnosti Renishaw umožňuje flexibilní aditivní výrobu součástí z celé řady použitelných kovů. Vychází ze starší platformy AM 250, která disponovala laserem o výkonu 200 W.



Obrázek 21: Zařízení AM 400 [22]

Stroj je vybaven nejnovějšími systémovými aktualizacemi, zdokonaleným řídicím systémem optiky a silnějším 400W laserem. Uzavírací ventily práškového zásobníku umožňují doplnění materiálu během procesu výroby. Zásobník je demontovatelný, což zjednodušuje čištění a umožňuje výměnu většího počtu zásobníků s odlišnými druhy materiálů. Uzavíratelnými ventily disponuje i zásobník na přebytečný materiál, nespotřebovaný prášek je tak možné prosít a vrátit zpět v průběhu procesu výroby. Přehled základních parametrů tohoto zařízení lze vidět v následující tabulce. [23]

Tabulka 1: Základní technické parametry [24]

Základní technické parametry zařízení AM 400		
Rozměry pracovního prostoru (X × Y × Z)	250 × 250 × 300	mm
Maximální velikost součásti (X × Y × Z)	248 × 248 × 385	mm
Rychlost tavení	5 – 20	cm ³ · hod ⁻¹
Rychlost skenování	2000	mm · s ⁻¹
Rychlost polohování	700	mm · s ⁻¹
Výkon laseru	400	W
Průměr paprsku	70	μm

Zařízení AM 400 má vlastnosti stávajícího systému AM 250, mezi které patří otevřené materiálové parametry, mály půdorys, čistá inertní atmosféra a nízká spotřeba plynu. V případě tohoto zařízení je stavební prostor po dobu výrobního procesu vyplněný argonem (inertní plyn). Na výrobním stroji AM 400 lze tisknout korozivzdornou ocel (316L, 174PH), nástrojovou ocel (H13), hliníkovou slitinu AlSi12 a titanové slitiny (CP, Ti6Al4V, Ti6Al7Nb). Dále pak niklové slitiny (Inconel 718, Inconel 625) a kobalt-chromovou slitinu ASTM75. [23]

4.2 Nerezová ocel 316L

K výrobě zkušebních vzorků pro praktickou část této diplomové práce, byl použit prášek nerezové oceli 316L. Jedná se o materiál dodaný výrobcem stroje, tedy společností Renishaw. Ta v rámci dosažení optimálního výkonu výroby doporučuje používat prášky z jejich nabídky. Tyto prášky jsou důkladně vyvíjeny a testovány s cílem zabezpečení trvale vysoké kvality a konzistentních parametrů (mechanické, fyzikální a chemické

parametry). Renishaw je také členem fóra ASTM International, zabývajícím se specifikací a standardizací práškových kovů určených pro použití v aditivní výrobě. [24]

Prášek oceli 316L je určený pro tloušťku vrstvy 50 μm . V následujících tabulkách jsou uvedeny jeho fyzikální vlastnosti, chemické složení a mechanické vlastnosti po tepelném zpracování. [25]

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti nerezové oceli 316L [26]

Hustota	799	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Tepelná vodivost	16,2	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Bod tání	1371 – 1399	$^{\circ}\text{C}$
Teplotní součinitel el. odporu	$16 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}

Tabulka 3: Chemické složení nerezové oceli 316L [26]

-	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
%	kolísá	16–18	10–14	2–3	≤ 2	≤ 1	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,045$	$\leq 0,03$	

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti oceli 316L po tepelném zpracování [26]

Mez pevnosti v tahu		
Vodorovný směr (XY)	662 ± 2	MPa
Svislý směr (Z)	574 ± 10	MPa
Mez kluzu		
Vodorovný směr (XY)	518 ± 5	MPa
Svislý směr (Z)	440 ± 10	MPa
Poměrné prodloužení		
Vodorovný směr (XY)	38 ± 1	%
Svislý směr (Z)	26 ± 12	%
Modul pružnosti		
Vodorovný směr (XY)	167 ± 8	GPa
Svislý směr (Z)	134 ± 17	GPa
Tvrdost podle Vickerse		
Vodorovný směr (XY)	212 ± 2	HV0,5
Svislý směr (Z)	220 ± 6	HV0,5
Drsnost povrchu Ra		
Vodorovný směr (XY)	10 – 16	μm
Svislý směr (Z)	5 – 8	μm

4.3 Výroba zkušebních vzorků

Pro účely této diplomové práce bylo pomocí dvou odlišných strategií technologie SLM vyrobeno 6 zkušebních vzorků o průměru 12 mm. Tři vzorky byly vyhotovené strategií Stripe a 3 vzorky strategií Chessboard (popis strategie viz kapitola 1.3). Všech 6 vzorků bylo spolu s dalšími umístěno na jednu platformu výrobního zařízení.

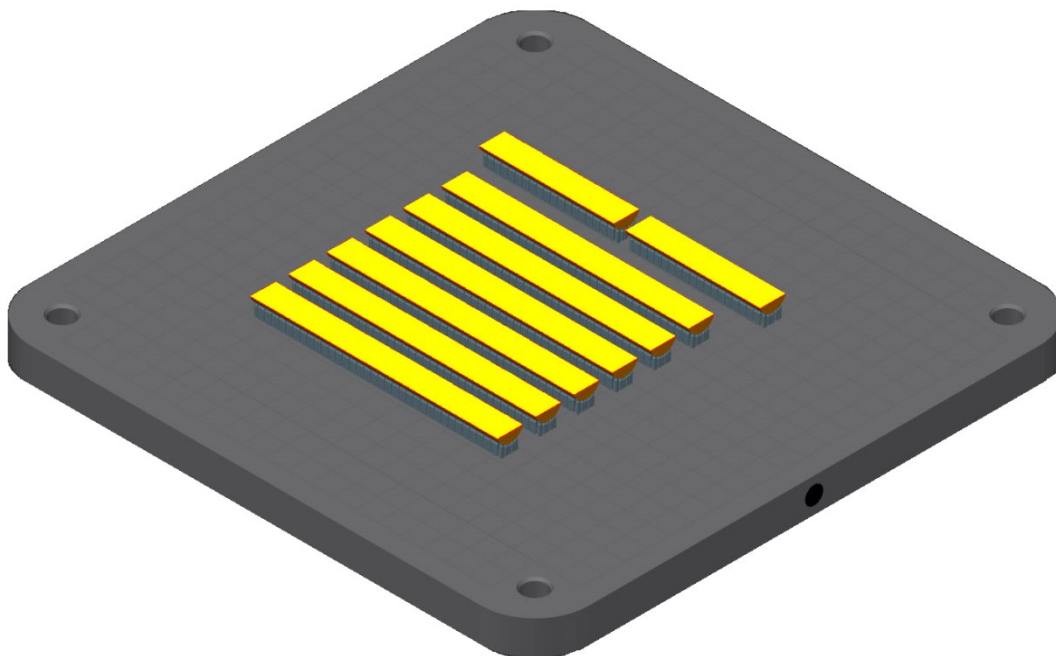
Orientaci a způsob umístění jednotlivých zkušebních vzorků lze vidět na následujících snímcích.



Obrázek 22: Umístění vzorků na platformě výrobního stroje

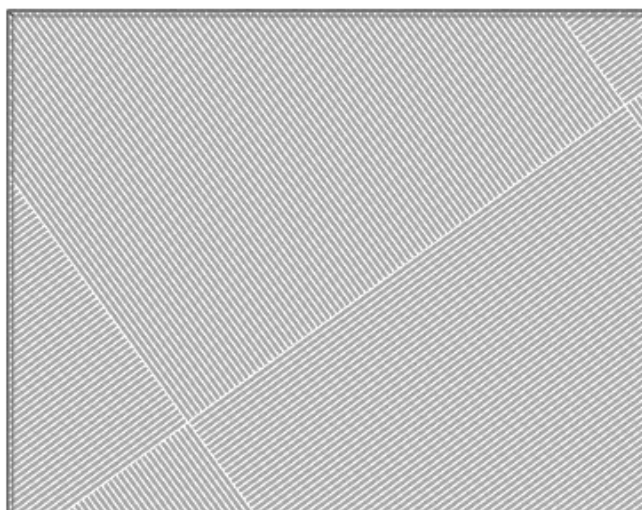


Obrázek 23: Orientace vzorků na platformě výrobního stroje



Obrázek 24: Řez vzorků v prostředí programu QuantAM

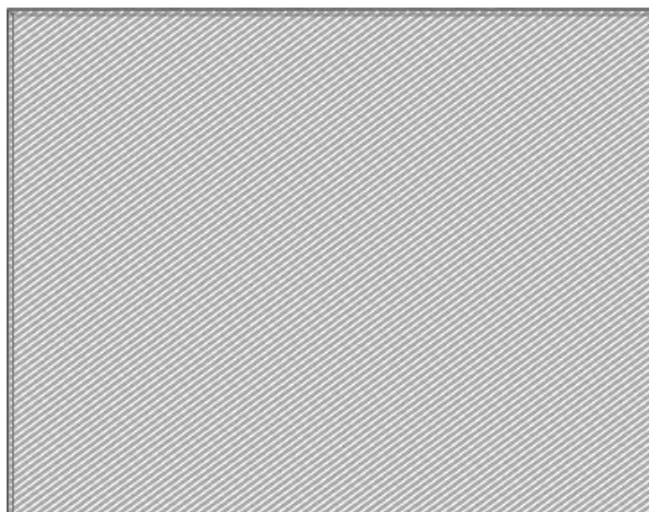
Na průřezu vyráběných vzorků, vytvořeném v prostředí programu QuantAM, jsou patrné dráhy laseru pro jednotlivé strategie tisku. Na následujícím snímku lze vidět průřez vzorku vyrobeného strategií Chessboard, kdy po vyhotovení jedné vrstvy došlo k pootočení následující vrstvy o 67° .



Obrázek 25: Řez vzorku v programu QuantAM u strategie Chessboard

Skenovací vektory laseru jsou v tomto případě rozděleny do jednotlivých oken stejných rozměrů, které jsou vůči sobě pootočený o 90° . Pootočení o 67° u následující

vrstvy bylo provedeno i u strategie Stripe. V následujícím řezu lze vidět rozvržení jednotlivých dráhových vektorů laseru pro tuto strategii.



Obrázek 26: Řez vzorku v programu QuantAM u strategie Stripe

Doba výroby všech vzorků rozložených na platformě výrobního stroje činila 14 hodin a 19 minut. Což potvrzuje jednu z hlavních současných nevýhod 3D tisku, tedy příliš dlouhou dobu výrobního procesu. Za tuto dobu bylo v rámci výroby nanесeno 320 vrstev práškového materiálu. To při tloušťce vrstvy 50 μm znamená, že celková výška stavby je rovna 16 mm (vzorky i s naprogramovanými podpěrami). Následující tabulka zobrazuje shrnutí obecných informací tisku všech dílů na výrobní platformě stroje.

Tabulka 5: Shrnutí celkové výroby

Základní výrobní informace		
Celková doba výroby	869	min
Celková cena	634	€
Celková výška stavby	16	mm
Celkový počet vrstev	320	–
Celkový objem dílů	88117	mm^3
Celkový objem podpor	14423	mm^3
Maximální výkon	200	W

Parametry výroby jednotlivých vzorků jsou rozdílné pouze v použité strategii. Ostatní níže uvedené parametry jsou u všech vyrobených vzorků shodné.

Tabulka 6: Parametry tisku jednotlivých vzorků

Vzorek č.	Strategie tisku	Tloušťka vrstvy [mm]	Počet vrstev
1	STRIPE	0,05	240
2	STRIPE	0,05	240
3	STRIPE	0,05	240
4	CHESSBOARD	0,05	240
5	CHESSBOARD	0,05	240
6	CHESSBOARD	0,05	240

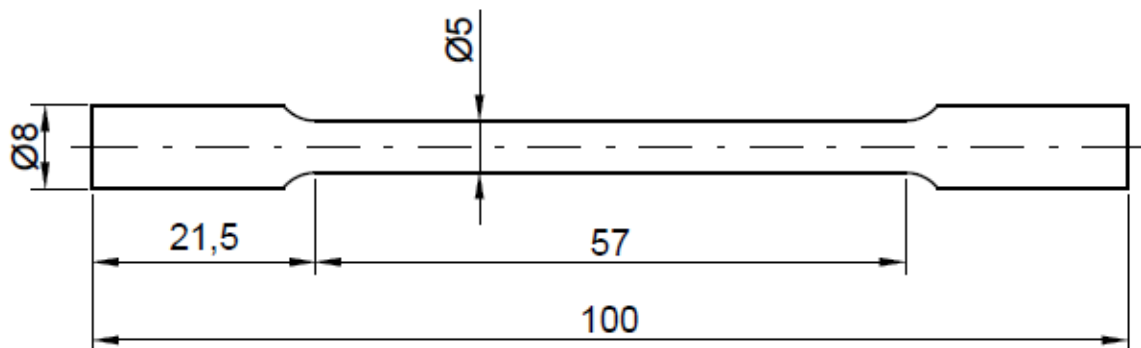
Jednotlivé výrobní parametry jako výkon, bodová vzdálenost a doba expozice se mění v závislosti na stylu výroby a druhu vyráběných úseků. Vyráběnými úseky je myšleno rozdělení skenování do určitých ploch. Jedná se o skenování objemu a spodního nebo vrchního pláště (slupky). V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry tisku zadaných vzorků pro jednotlivé druhy vyráběných ploch, jak pro styl Border (okraje), tak pro Hatches (šrafování). Navíc jsou zde uvedeny parametry pro Additional Border (dodatečné okraje), které jsou aplikovány u skenování objemu a spodního pláště.

Tabulka 7: Parametry tisku u jednotlivých povrchů

Parametry tisku	Border	Hatches	Additional Border	-
Skenování vrchního pláště				
Výkon	-	160	-	W
Bodová vzdálenost	-	50	-	μm
Doba expozice	-	110	-	μs
Skenování spodního pláště				
Výkon	200	100	200	W
Bodová vzdálenost	70	40	70	μm
Doba expozice	50	80	50	μs
Skenování objemu				
Výkon	110	200	200	W
Bodová vzdálenost	20	60	40	μm
Doba expozice	100	80	90	μs

Po dokončení procesu výroby technologií SLM na stroji AM 400, byl z pracovní komory stroje odsán přebytečný kovový prášek. Platforma s vyrobenými vzorky byla vyňatá ze stroje a vzorky posléze odřezány z jejího povrchu.

Aby mohli být vzorky podrobeny zkoušce tahem, museli být obrobena na požadovaný rozměr zkušebních těles.



Obrázek 27: Požadované rozměry zkušebních vzorků

5. Vyhodnocení tahové zkoušky

Tahová zkouška byla uskutečněna ve spolupráci s Katedrou aplikované mechaniky na VŠB – TU Ostrava. Zkouška byla provedena na šesti vzorcích, vyrobených technologií SLM. Tři vzorky byly vyrobeny strategií Stripe (šarže S) a zbylé tři strategií Chessboard (šarže CH).

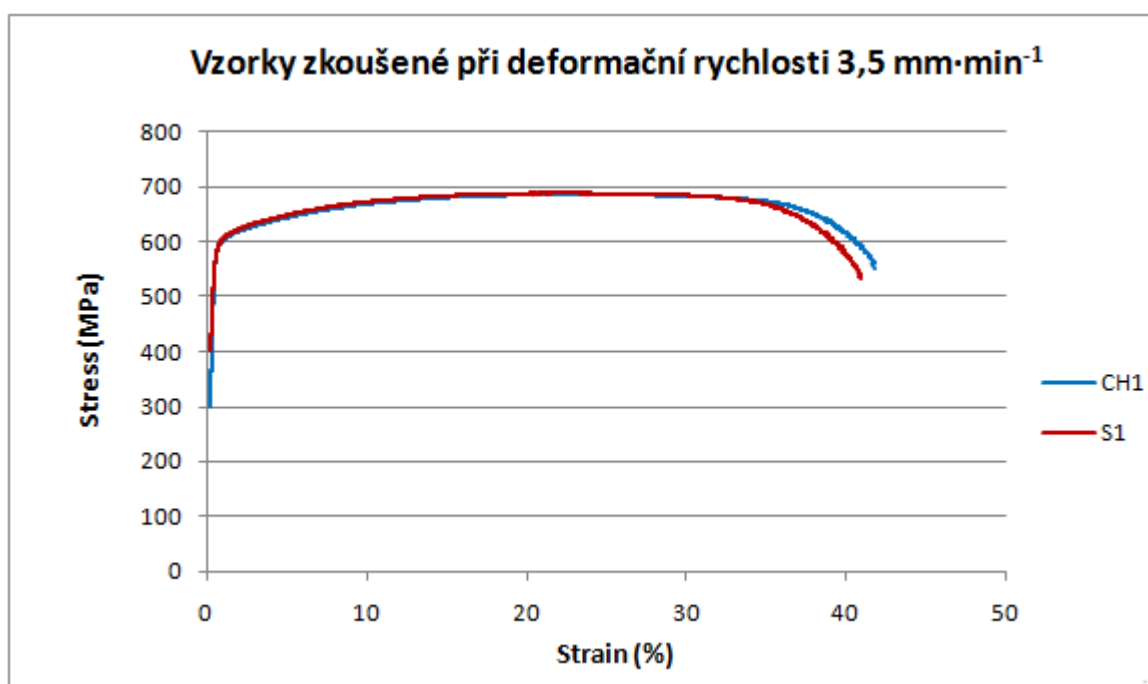
Testování zkušebních vzorků probíhalo za různých deformačních rychlostí, kdy byly vždy vzájemně porovnávány vzorky šarže CH a S. Zkoušelo se tak při třech deformačních rychlostech, které byly: $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; $17,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Výsledky tahové zkoušky při daných deformačních rychlostech jsou uvedeny v následujících tabulkách a grafech.

Výsledky vzorků zkoušených při deformační rychlosti $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Tabulka 8: Výsledková tabulka vzorků CH_1 a S_1 při rychlosti $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Výsledky pro rychlost $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	CH_1	S_1	-
Max. síla F_{\max}	13 254	13 301	N
Max. deformace (tažnost)	46,4	42,039	%
Deformace pro F_{\max}	27,32	21,919	%
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	548,78	556,41	MPa
Mez pevnosti v tahu R_m	685,641	688,384	MPa
Youngův modul	185 679,347	183 710,523	MPa

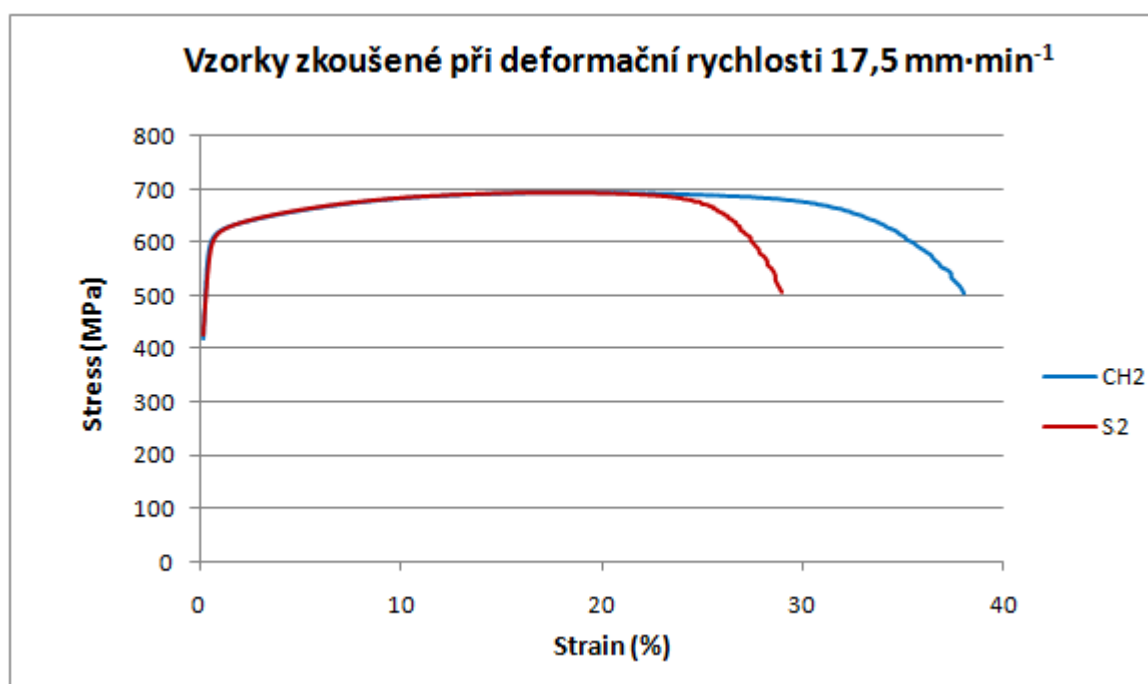


Obrázek 28: Graf porovnání hodnot vzorků CH_1 , S_1

Výsledky vzorků zkoušených při deformační rychlosti $17,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Tabulka 9: Výsledková tabulka vzorků CH_2 a S_2 při rychlosti $17,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Výsledky pro rychlost $17,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	CH_2	S_2	-
Max. síla F_{\max}	13 431	13 373	N
Max. deformace (tažnost)	38,038	29,958	%
Deformace pro F_{\max}	18,118	18,318	%
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	588,557	563,186	MPa
Mez pevnosti v tahu R_m	695,113	694,910	MPa
Youngův modul	189 271,5	188 024,2	MPa



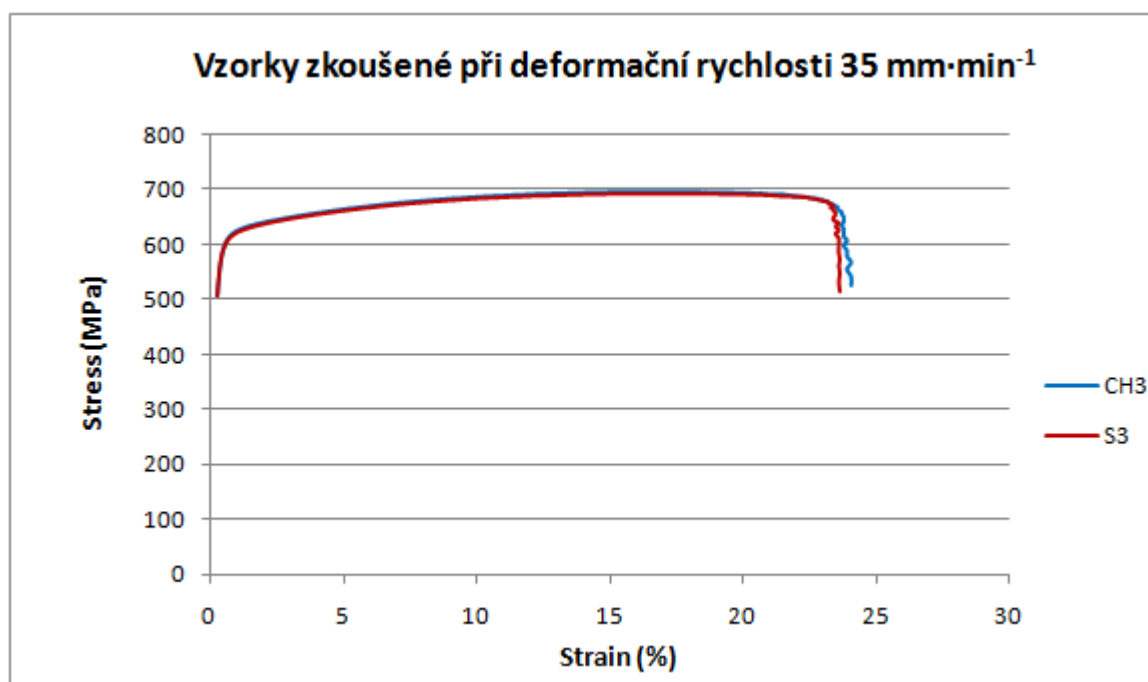
Obrázek 29: Graf porovnání hodnot vzorků CH_2 , S_2

Větší rozdíl maximální deformace u vzorku S_2 , zapříčinil krček v okolí hrotu.

Výsledky vzorků zkoušených při deformační rychlosti $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Tabulka 10: Výsledková tabulka vzorků CH_3 a S_3 při rychlosti $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

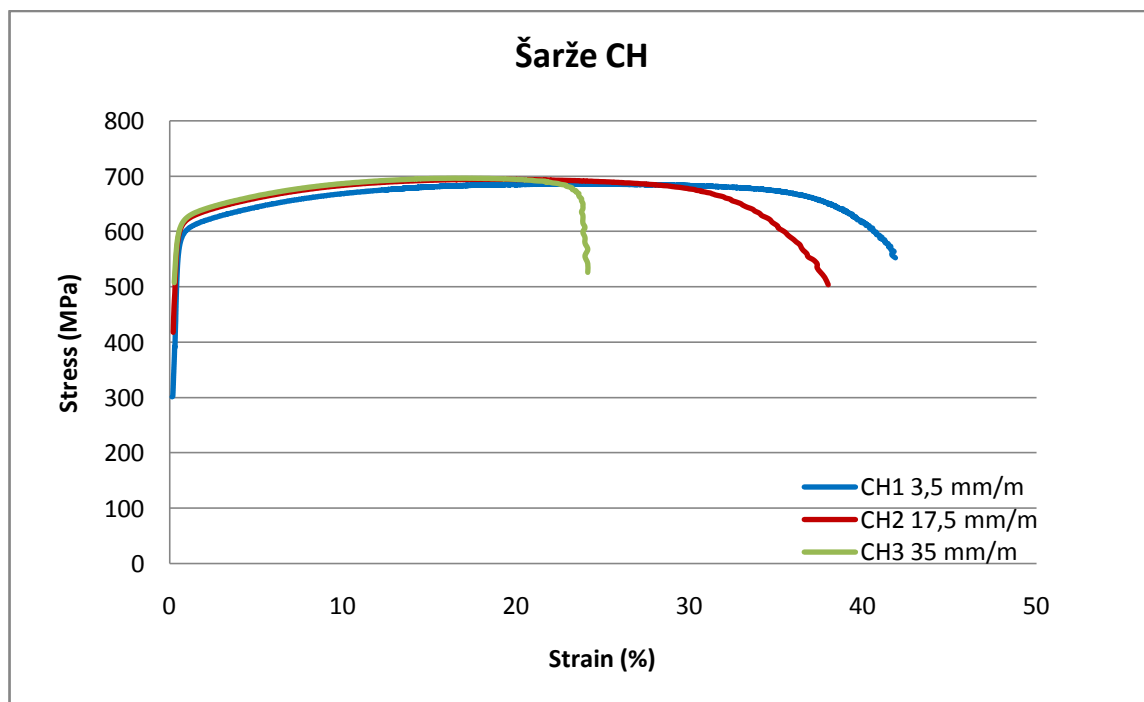
Výsledky pro rychlost $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	CH_3	S_3	-
Max. síla F_{\max}	13 463	13 402	N
Max. deformace (tažnost)	25,92	24,84	%
Deformace pro F_{\max}	18,2	17,56	%
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	596,584	594,37	MPa
Mez pevnosti v tahu R_m	696,769	693,612	MPa
Youngův modul	192 419,136	164 329,278	MPa



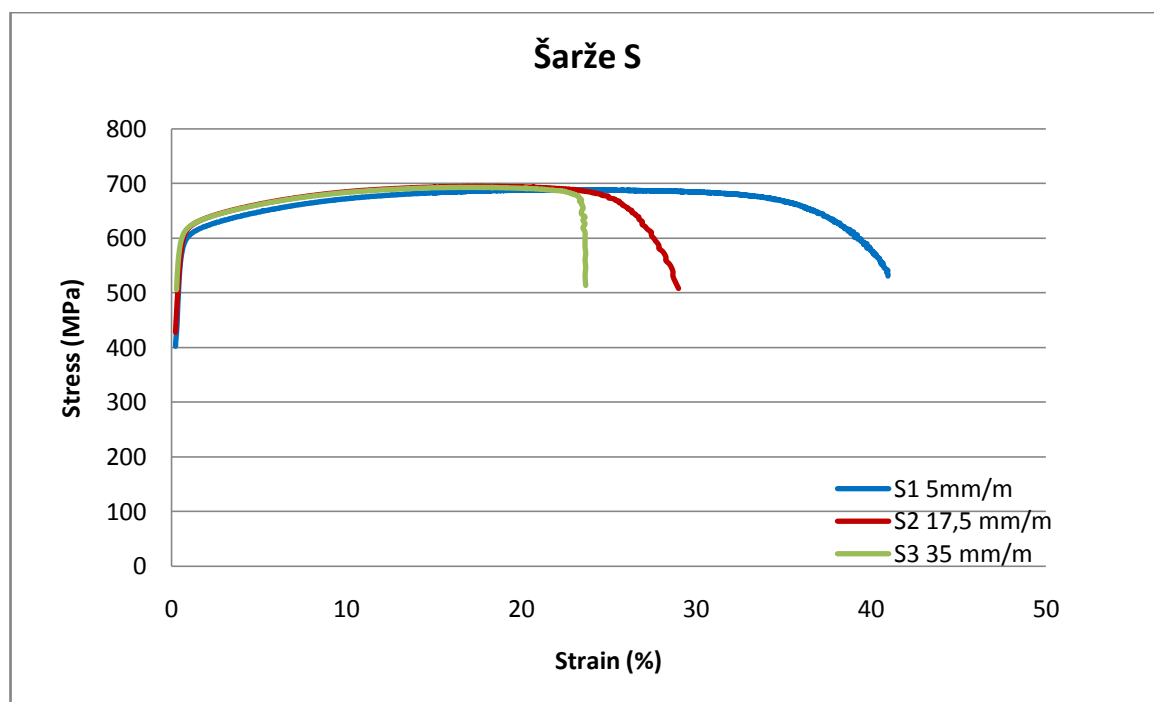
Obrázek 30: Graf porovnání hodnot vzorků CH_3 , S_3

Oba vzorky praskly v okolí hrotu. Z toho plyne, že výsledek maximální deformace není korektní.

Sjednocení jednotlivých vzorků šarže CH a S pro jednotlivé deformační rychlosti



Obrázek 31: Graf porovnání jednotlivých vzorků šarže CH

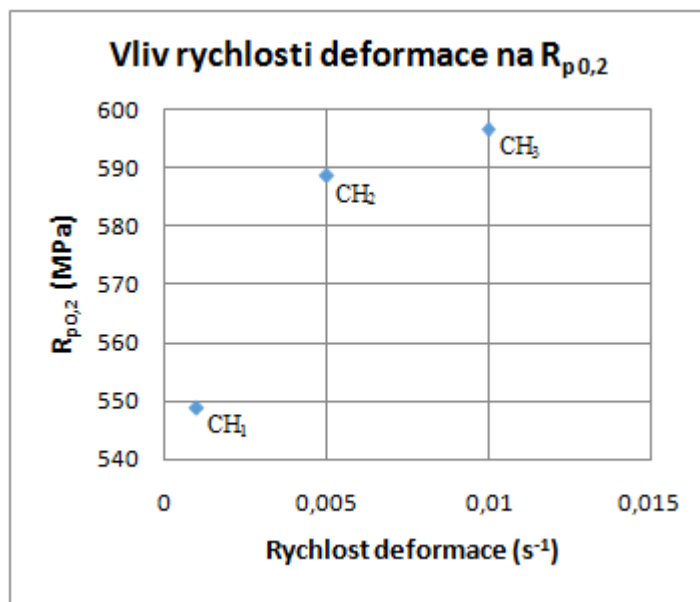


Obrázek 32: Graf porovnání jednotlivých vzorků šarže S

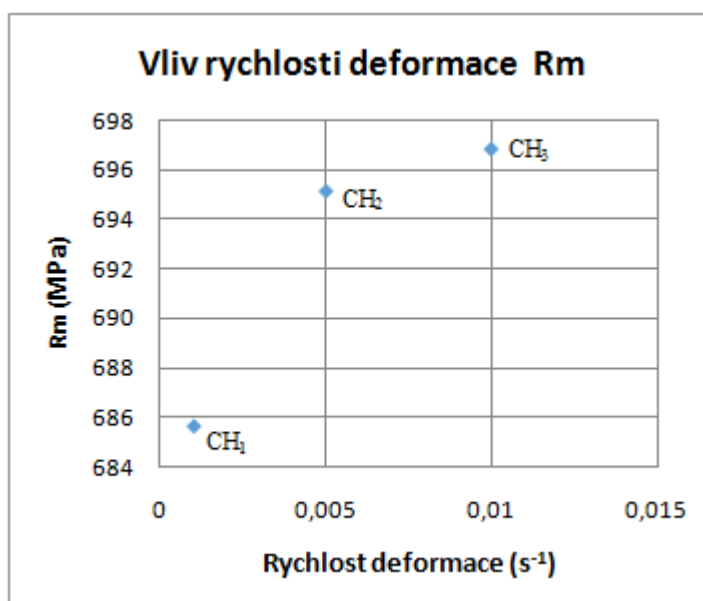
Vliv rychlosti deformace na $R_{p0,2}$ R_m pro vzorky šarže CH

Tabulka 11: Hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m pro vzorky šarže CH

Vzorek	CH ₁	CH ₂	CH ₃	-
$R_{p0,2}$	548,8	588,6	596,6	MPa
R_m	685,6	695,1	696,8	MPa



Obrázek 33: Vliv rychlosti deformace na $R_{p0,2}$ u šarže CH

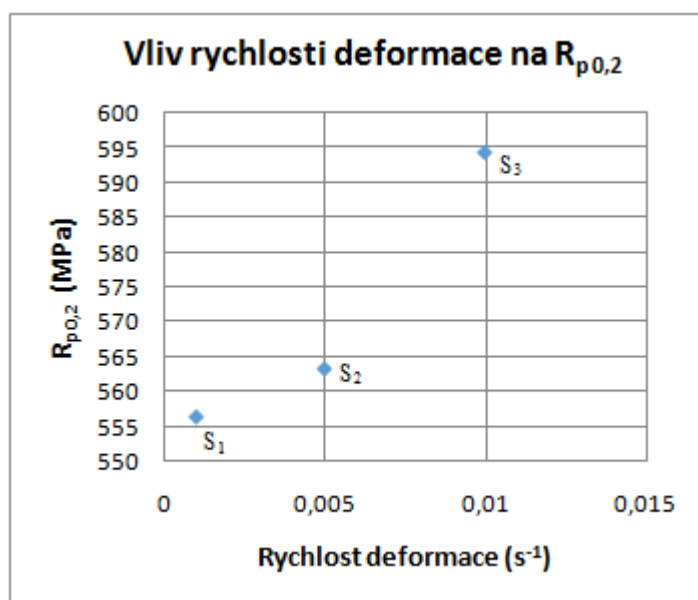


Obrázek 34: Vliv rychlosti deformace na R_m u šarže CH

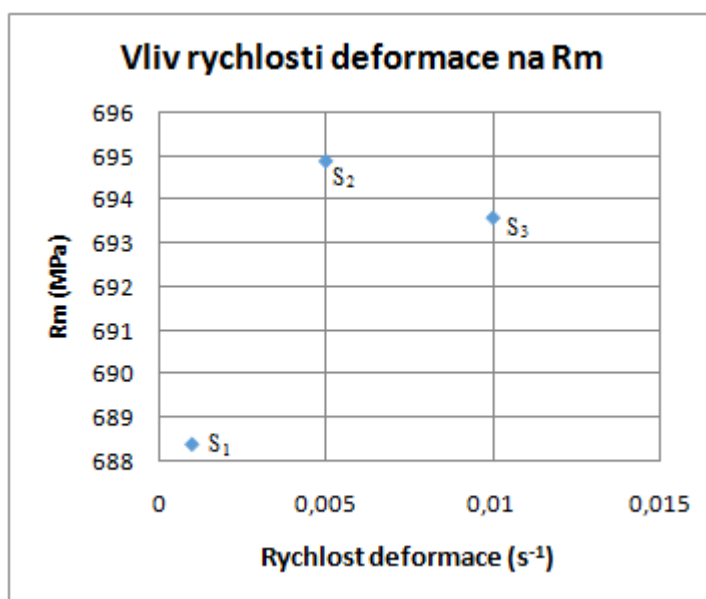
Vliv rychlosti deformace na $R_{p0,2}$ R_m pro vzorky šarže S

Tabulka 12: Hodnoty $R_{p0,2}$ a R_m pro vzorky šarže S

Vzorek	S ₁	S ₂	S ₃	-
$R_{p0,2}$	556,4	563,2	594,4	MPa
R_m	688,4	694,9	693,6	MPa



Obrázek 35: Vliv rychlosti deformace na $R_{p0,2}$ u šarže S



Obrázek 36: Vliv rychlosti deformace na R_m u šarže S

5.1 Zhodnocení výsledků Tahové zkoušky

V tabulce níže lze vidět souhrn získaných výsledků z tahové zkoušky pro vzorky vyrobené strategií Chessboard a Stripe.

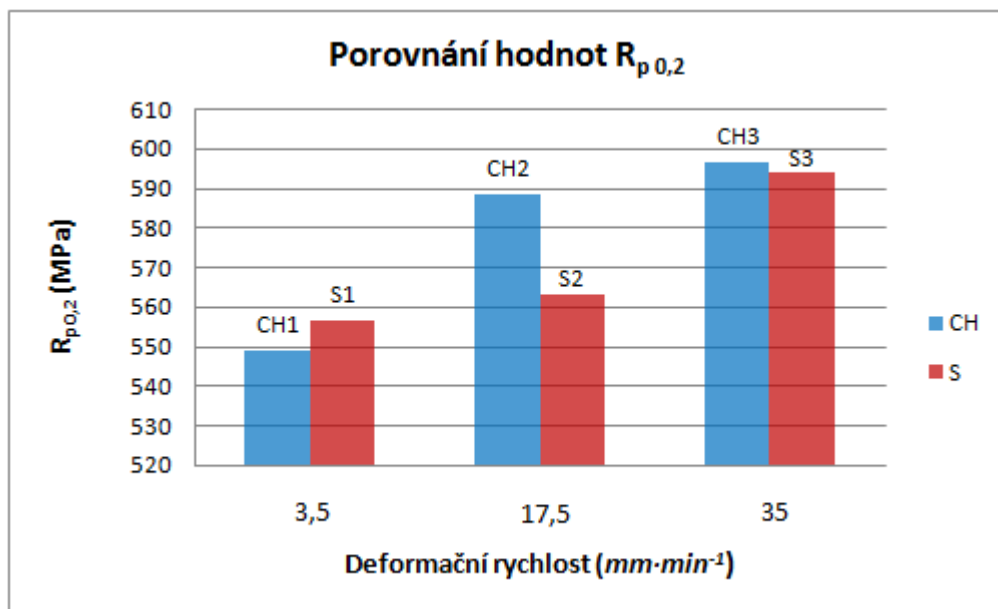
Tabulka 13: Souhrn výsledků tahové zkoušky pro strategii CHESSBOARD a STRIPE

Vzorek	Max. síla F_{\max} [N]	Max. deformace [%]	Deformace pro F_{\max} [%]	Smluvní mez kluzu $R_{p\ 0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Youngův modul [MPa]
CH ₁	13 254	46,4	27,32	548,78	685,641	185 679,3
S ₁	13 301	42,039	21,919	556,41	688,384	183 710,5
CH ₂	13 431	38,038	18,118	588,557	695,113	189 271,5
S ₂	13 373	29,958	18,318	563,186	694,910	188 024,2
CH ₃	13 463	25,92	18,2	596,584	696,769	192 419,1
S ₃	13 402	24,84	17,56	594,37	693,612	164 329,3

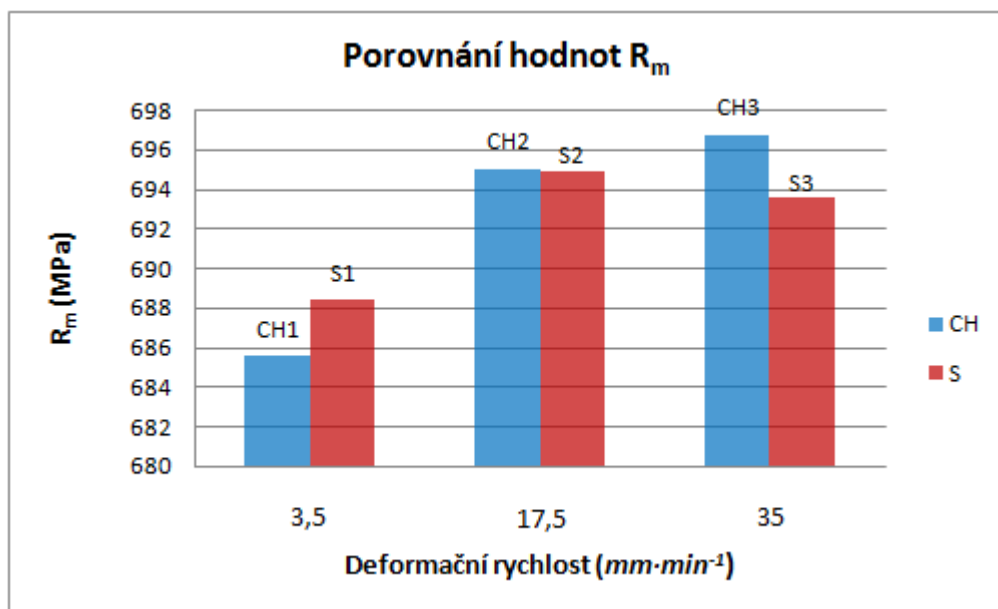
Rozdíl maximální deformace mezi vzorky CH₂ a S₂ byl zapříčiněn krčkem v okolí hrotu u vzorku S₂. U vzorků CH₃ a S₃ došlo k jejich prasknutí v okolí hrotu. Výsledek maximální deformace vzorků označených červeně tak není korektní.

Z dosažených výsledků vyplývá, že druh zvolené strategie má na dané mechanické vlastnosti zanedbatelný vliv. Vzorky šarže CH a S se totiž liší jen minimálně, prakticky v toleranci jedné tavby materiálu u běžně dostupných polotovarů. Na grafech níže lze vidět poměr $R_{p0,2}$ a R_m u jednotlivých vzorkových dvojic.

Vzhledem k přiloženým grafům na Obrázcích 33-36 lze konstatovat, že vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti nedosahoval tak výrazných hodnot jak by se očekávalo.



Obrázek 37: Porovnání smluvní meze kluzu u zkušebních vzorků



Obrázek 38: Porovnání meze pevnosti u zkušebních vzorků

Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou 3D tisku kovu technologií SLM ve vztahu k mechanickým vlastnostem a pórovitosti dílů, vyrobených z nerezové oceli 316L. Cílem teoretické části bylo zkoumání vlivů parametrů procesu SLM na mikrostrukturu a pórovitost výsledných struktur. Úkolem praktické části pak bylo zjistit, do jaké míry jsou mechanické vlastnosti vyrobených dílů ovlivněny zvolenou tavící strategií.

Úvod práce seznámil čtenáře s Aditivní výrobou a technologií selektivního spékání laserem. Byl zde popsán princip této technologie, její výhody, použití a strategie. Následoval rozsáhlý rozbor mechanismů vzniku pórovitosti, kde byly objasněny vlivy zvolených vstupních parametrů procesu na jednotlivé druhy mechanismů způsobující vznik nežádoucích pórů. V této souvislosti byla zjištěna optimální hustota laserové energie pro nerezovou ocel 316L. Dále byly zkoumány vlivy pórovitosti na mechanické vlastnosti vyrobených dílů. Závěr byl věnován popisu a charakteristice tahové zkoušky, která byla hlavním předmětem mechanického testování v druhé části práce.

Praktická část práce se ve svém úvodu zabývala výrobou zkušebních vzorků pro mechanické testování. Nejprve proběhlo seznámení s činností laboratoře Aditivní výroby fakulty strojní Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, kde byly zkušební vzorky vyrobeny. Následoval popis výrobního zařízení Renishaw AM 400, kde byly uvedeny jeho základní vlastnosti a parametry. Práce pokračovala charakteristikou kovového materiálu 316L, použitého pro výrobu zkušebních vzorků. Celkem bylo vyrobeno šest zkušebních vzorků. Tři vzorky strategií Stripe a tři strategií Chessboard. Vyrobené vzorky byly následně testovány tahovou zkouškou při různých deformačních rychlostech.

Závěrečná část práce se věnovala vyhodnocení výsledků tahové zkoušky. Konečné výsledky ukázaly, že druh zvolené strategie tisku technologií SLM má na výsledné mechanické vlastnosti zanedbatelný vliv. Rozdíly výsledných hodnot byly minimální, praktický v toleranci jedné tavby u běžně dostupných materiálů. Jedná se o poměrně zajímavé zjištění pro budoucí výzkum těchto stále se rozvíjejících technologií.

Další výzkum by mohl být zaměřen na možnost optimalizace dráhy laseru ve vztahu k tvorbě tzv. klíčové dírky, která je jedním s mechanismů vzniku pórovitosti. Ta má v tomto výrobním procesu tendenci vznikat ve startovacích a konečných pozicích laserového paprsku, kde laser začíná a končí s tavením materiálu. V každé vrstvě je těchto

startovacích a konečných bodů několik, v závislosti na použité strategii. V případě, že by došlo k optimalizaci dráhy laseru tak, aby byla jeho dráha kontinuální, mohl by se počet těchto bodů snížit. To by mohlo mít příznivý vliv na konečnou pórovitost a zlepšení výsledných mechanických vlastností vyrobených dílů.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Marek Pagáč, Ph.D. za jeho ochotu a odborné vedení mé diplomové práce.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2018/136 Specifický výzkum v oblasti obrábění a strojírenské metrologie s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Seznam použité literatury

- [1] GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich: Hanser, 2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [2] JAKEŠ, Jakub. *Aditivní technologie výroby*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie.
- [3] Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). *Konstrukteur* [online]. 2016 [vid. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2016/11/23/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [4] VERHEAGHE, F., HREAGHS, T., HEULENS, J., PANDELAERS, L. *A pragmatic model for selective laser melting with evaporation*. *Acta Materiala* [online]. 2009, vol. 57, no. 20, s. 6006-6012 [vid. 2018-01-08]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645409005394>
- [5] Frustum's Topology Optimization Comes to Siemens' NX Software in a Partnership Bringing Design Innovation to Additive Manufacturing. *3Dprint* [online]. 2017 [vid. 2018-01-10]. Dostupné z: <https://3dprint.com/169099/frustum-siemens-nx/>
- [6] ALSAM project aluminium lattice structures (png). *Renishaw* [online]. ©2001-2018 [vid. 2018-01-10]. Dostupné z: [http://resources.renishaw.com/details/ALSAM+project+aluminium+lattice+structures\(243282\)\(87500\)](http://resources.renishaw.com/details/ALSAM+project+aluminium+lattice+structures(243282)(87500))
- [7] Průmyslové aplikace Renishaw technologie aditivní výroby z kovu. *Renishaw* [online]. ©2001-2018 [vid. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/prumyslove-aplikace-renishaw-technologie-aditivni-vyroby-z-kovu--15256>
- [8] *Design for metal AM - a beginner's guide* [online]. ©2001-2018, 17 August 2017 [vid. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>

- [9] DEBROY, T., H.L. WEI, J.S. ZUBACK, T. MUKHERJEE, J.W. ELMER, J.O. MILEWSKI a A.M. BEESE. *Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Progress in Materials Science* [online]. 2018, vol. 92, s. 112-224 [vid. 2018-02-01]. ISSN 0079-6425. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172#f0005>

- [10] SAMES, W. J., F. A. LIST, S. PANNALA, R. R. DEHOFF a S. S. BABU. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. International Materials Reviews* [online]. 2016, vol. 61, no.5, s. 315-360 [vid. 2018-02-01]. ISSN 0950-6608. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2015.1116649>

- [11] DENG, Donyong. *Additively Manufactured Inconel 718 : Microstructures and Mechanical Properties* [online]. Linköping: Departement of Management and Engineering (IEI) Linköping University, 2018 [vid. 2018-02-02]. ISBN 978-91-7685-383-2. Dostupné z: <https://books.googleusercontent.com/books/content?req=AKW5QackcyvWmhKNqQ7NoSqatDVAOvpv>

- [12] DOBROVOLNÝ, Jan. *Studium mikrostruktury a mechanických vlastností ocelových vzorků zhotovených 3D tiskem*. Ostrava, 2017. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie

- [13] GU, Dongdong a Yifu SHEN. *Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. Materials & Design* [online]. 2009, vol. 30, no.8, s. 2903-2910 [vid. 2018-02-08]. ISSN 0261-3069. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909000181?via%3Dihub#fig6>

- [14] LI, Ruidi, Jinhui LIU, Yusheng SHI, Li WANG a Wei JIANG. *Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process* [online]. 2011 [vid. 2018-02-08] DOI: 10.1007/s00170-011-3566-1. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-011-3566-1.pdf>

- [15] CHERRY, J.A., H.M. DAVES, S. MEHMOOD, N.P. LAVERY, S.G.R. BROWN a J. SIENZ. *Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting* [online]. Springer-Verlag London, 2014 [vid. 2018-02-18]. DOI: 10.1007/s00170-014-6297-2. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-014-6297-2.pdf>
- [16] SUN, Zhongji, Xipeng TAN, Shu BENG a Wai YEE YANG. *Selective laser melting of stainless steel 316L with low porosity and high build rate. Materials & Design* [online]. 2016, vol. 104, s. 197-204 [vid. 2018-02-20]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516306372>
- [17] CHAWLA, N. a X. DENG. *Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels. Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, vol. 390, s. 98-112 [vit. 2018-02-25]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509304010111>
- [18] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [19] SILBERNAGEL, Arnošt. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [20] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [21] Laboratoř aditivní výroby: O laboratoři. *3D-tisk-kovu* [online]. ©2018 [vid. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://3d-tisk-kovu.cz/zkusebni/>
- [22] Začínáme s 3D tiskem kovů #1: Příprava laboratoře. *Konstruktor* [online]. 2016 [vid. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.konstruktor.cz/2016/10/10/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-1/>
- [23] Additive manufacturing systems: AM400. Renishaw [online]. ©2001-2018 [vid. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/am-400--35456>

- [24] Laboratoř aditivní výroby: Vybavení. *3D-tisk-kovu* [online]. ©2018 [vid. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://3d-tisk-kovu.cz/vybaveni/>
- [25] Práškové kovy: Vysoce kvalitní kovové prášky společnosti Renishaw. Renishaw [online]. ©2001-2018 [cit. 2018-04-1]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/praskove-kovy--31458>
- [26] Laboratoř aditivní výroby: Práškové kovy. *3D-tisk-kovu* [online]. ©2018 [vid. 2018-04-7]. Dostupné z: <http://3d-tisk-kovu.cz/materialy/>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Princip technologie SLM [4]</i>	11
<i>Obrázek 2: Topologická optimalizace konkrétní součásti [5]</i>	12
<i>Obrázek 3: Příklad nosníkových výplní [6]</i>	13
<i>Obrázek 4: Strategie skenování práškového materiálu [8]</i>	14
<i>Obrázek 5: Mechanismy vzniku pórovitosti u SLM [10]</i>	16
<i>Obrázek 6: Snímky kapsy s nespečeným práškem [11]</i>	16
<i>Obrázek 7: Vznik póru při uzavření klíčové dírky</i>	17
<i>Obrázek 8: Tvorba kovových kapiček při slinování [14]</i>	18
<i>Obrázek 9: Snímky mikrostruktury laserové stopy [13]</i>	19
<i>Obrázek 10 Schéma rozstříku roztavených kapek [13]</i>	19
<i>Obrázek 11: Výsledná pórovitost vyrobených vzorků [15]</i>	20
<i>Obrázek 12: Závislost energie laseru na drsnosti povrchu</i>	21
<i>Obrázek 13: Snímky vybraných vzorků [16]</i>	23
<i>Obrázek 14: Graf tahové zkoušky porézních struktur [17]</i>	24
<i>Obrázek 15: Diagram tahové zkoušky [18]</i>	27
<i>Obrázek 16: Grafické stanovení smluvní meze kluzu [48]</i>	29
<i>Obrázek 17: Základní druhy lomů zkušebních vzorků [18]</i>	30
<i>Obrázek 18: Zkušební tyč s válcovými hlavami [18]</i>	31
<i>Obrázek 19: Zkušební tyč pro upínání do kroužků [18]</i>	31
<i>Obrázek 20: Zkušební tyč se závitovými hlavami [18]</i>	32
<i>Obrázek 21: Zařízení AM 400 [23]</i>	33
<i>Obrázek 22: Umístění vzorků na platformě výrobního stroje</i>	36

<i>Obrázek 23: Orientace vzorků na platformě výrobního stroje</i>	36
<i>Obrázek 24: Řez vzorků v prostředí programu QuantAM</i>	37
<i>Obrázek 25: Řez vzorku v programu QuantAM u strategie Chessboard</i>	37
<i>Obrázek 26: Řez vzorku v programu QuantAM u strategie Stripe</i>	38
<i>Obrázek 27: Požadované rozměry zkušebních vzorků</i>	40
<i>Obrázek 28: Graf porovnání hodnot vzorků CH_1, S_1</i>	42
<i>Obrázek 29: Graf porovnání hodnot vzorků CH_2, S_2</i>	43
<i>Obrázek 30: Graf porovnání hodnot vzorků CH_3, S_3</i>	44
<i>Obrázek 31: Graf porovnání jednotlivých vzorků šarže CH</i>	45
<i>Obrázek 32: Graf porovnání jednotlivých vzorků šarže S</i>	45
<i>Obrázek 33: Vliv rychlosti deformace na $R_{p\ 0,2}$ u šarže CH</i>	46
<i>Obrázek 34: Vliv rychlosti deformace na R_m u šarže CH</i>	46
<i>Obrázek 35: Vliv rychlosti deformace na $R_{p\ 0,2}$ u šarže S</i>	47
<i>Obrázek 36: Vliv rychlosti deformace na R_m u šarže S</i>	47
<i>Obrázek 37: Porovnání smluvní meze kluzu u zkušebních vzorků</i>	47
<i>Obrázek 38: Porovnání meze pevnosti u zkušebních vzorků</i>	47

Seznam tabulek

<i>Tabulka 14: Základní technické parametry [24]</i>	33
<i>Tabulka 15: Fyzikální vlastnosti nerezové oceli 316L []</i>	34
<i>Tabulka 16: Chemické složení nerezové oceli 316L []</i>	34
<i>Tabulka 17: Mechanické vlastnosti oceli 316L po tepelném zpracování []</i>	34
<i>Tabulka 18: Shrnutí celkové výroby</i>	37
<i>Tabulka 19: Parametry tisku jednotlivých vzorků</i>	38
<i>Tabulka 20: Parametry tisku u jednotlivých povrchů</i>	38
<i>Tabulka 21: Výsledková tabulka vzorků CH_1 a S_1 při rychlosti $3,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$</i>	41
<i>Tabulka 22: Výsledková tabulka vzorků CH_2 a S_2 při rychlosti $17,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$</i>	42
<i>Tabulka 23: Výsledková tabulka vzorků CH_3 a S_3 při rychlosti $35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$</i>	43
<i>Tabulka 24: Hodnoty $R_{p\ 0,2}$ a R_m pro vzorky šarže CH</i>	45
<i>Tabulka 25: Hodnoty $R_p\ 0,2$ a R_m pro vzorky šarže S</i>	46